

**Andréa Araújo Sousa**

**Um Estimador de Estado de Redes de  
Distribuição de Energia Elétrica Baseado em  
*Simulated Annealing***

**Campina Grande – Paraíba – Brasil  
Março de 2005**

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Um Estimador de Estado de Redes de  
Distribuição de Energia Elétrica Baseado em  
*Simulated Annealing***

Dissertação Apresentada à Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

**Andréa Araújo Sousa**

**Área de Concentração: Processamento da Energia**

**Benemar Alencar de Souza, D.Sc.**  
Orientador

**Campina Grande – Paraíba – Brasil  
Março de 2005**

---

---

**Andréa Araújo Sousa**

**Um Estimador de Estado de Redes de  
Distribuição de Energia Elétrica Baseado em  
*Simulated Annealing***

Dissertação Aprovada em 23/03/2005

**Benemar Alencar de Souza, D.Sc., UFCG**  
Orientador

**Núbia Silva Dantas Brito, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca

**Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D., UFPE**  
Componente da Banca

**Wellington Santos Mota, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca

**Campina Grande – PB  
Março – 2005**

---

---

Ao meu marido, Rômulo, e a  
meus pais, Orlando e Lourdes,  
pelo carinho, amor e apoio,  
DEDICO.

---

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser tão bom para mim. A Jesus Cristo, por me apoiar perante Ele.

Ao meu orientador, Benemar Alencar de Souza, pela orientação, pela instrução e pela confiança.

Aos professores José Gutemberg de Assis Lira e Bruno Barbosa Albert por terem dado referências que me ajudaram a ingressar no mestrado.

Aos professores Washington Neves, Edison Roberto e Edson Guedes pelo conhecimento que adquiri nas disciplinas ministradas.

Ao professor Ubirajara Rocha Meira pela parceria no estágio docência.

A Gustavo Henrique Machado de Arruda, pela ajuda no início do mestrado e pela amizade secular.

A Ângelo Márcio Formiga de Almeida, pela amizade, pelos conselhos e por tirar dúvidas.

A Marcília Vieira da Nóbrega, pelos conselhos e orientações e pela grande amizade.

A Helon David e a João Marcelo, pela parceria em trabalhos.

Aos amigos e colegas do LAT e da UFCG, pelo companheirismo e disposição em ajudar: Josivan Sampaio, Luciano Sales, Franklin Pamplona, Darlan Alexandria, Fabiano, Eduardo, Damásio Fernandes, Diana Nobre, Ronimack Trajano, Aluizio Bento, José Antônio.

Aos funcionários do LAT e da COPELE pela prestação de serviços.

À CAPES e à COPELE, pela bolsa concedida durante o programa de mestrado.

---

## RESUMO

Estimativas das tensões de barras e das perdas de potência em alimentadores primários de distribuição são sempre necessárias. Entretanto, o número de medições que são disponíveis para fazer isso é muito pequeno. Normalmente, são feitas medições apenas na saída da subestação e nas barras onde estão conectados consumidores especiais. Nas outras barras, que são a grande parte do sistema, só se têm informações sobre a potência nominal dos transformadores ali instalados. Neste trabalho, propõe-se um método de estimação de estado de alimentadores de distribuição, ou seja, de determinação dos valores aproximados das tensões de barras e das perdas técnicas totais. Para isso, realiza-se um ajuste das cargas comuns (exceto as cargas especiais) mediante estimação de fatores de potência e fatores de utilização. Para cada ponto de medição disponível (P, Q, V e I), calcula-se um fator de potência e um fator de utilização que será atribuído às cargas a jusante daquele ponto. O cálculo desses fatores de potência e de utilização é feito utilizando-se um algoritmo *simulated annealing*, as medidas disponíveis e os valores dos transformadores de distribuição instalados nas barras. O método foi aplicado aos alimentadores-teste do IEEE de 13, 34, 37 e 123 barras e a validação é feita a partir da comparação dos valores obtidos com os valores conhecidos dos resultados desses alimentadores.

---

## ABSTRACT

Estimation of bus voltages and power losses in primary distribution feeders are important for system planning and operation. However, the number of measurements that are available to do that is very small. Usually, there are just measurements in the substation exit and in buses where special consumers are connected. The nominal MVA of the transformers installed in all the other buses is the only information that one had. In this work, a state estimation method for distribution feeders is proposed. So, approximated value of voltage buses and the total technical losses can be determined. For that, it takes place an adjustment of the common loads by estimating of power factor and utilization factors. For each point of available measurement (P, Q, V and I), power factor and utilization factor are calculated to be attributed to the loads installed after that point. A simulated annealing algorithm is used to calculate both power factors and utilization factors. The available measures and the values of nominal power of the distribution transformers are the only required data. The method was applied to the IEEE 13, 34, 37 and 123 buses test feeders and the validation is made starting from the comparison of the values obtained with the known values of the results of these feeders.

---

# ÍNDICE

SIMBOLOGIA.....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xii
INTRODUÇÃO .....	1
1.1. MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVO .....	1
1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
1.4. COMPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	4
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	6
2.1. ESTIMAÇÃO DE ESTADO.....	6
2.1.1. Métodos de Estimação de Estado .....	7
2.2. PERDAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	7
2.2.1. Identificação e Classificação das Perdas .....	8
2.2.2. Custo das Perdas .....	9
2.2.3. Cálculo das Perdas em Alimentadores de Distribuição .....	9
2.2.3.1. Pela Curva de Carga do Alimentador .....	9
2.2.3.2. Pela Curva de Carga Típica.....	10
2.2.3.3. Estimação das Perdas .....	11
2.3. O MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS .....	11
2.4. SIMULATED ANNEALING .....	13
2.4.1. Otimização Combinatória.....	13
2.4.2. Heurística e Metaheurística .....	14
2.4.3. Mecânica Estatística.....	14
2.4.4. Da Física à Otimização Combinatória .....	15
2.4.5. Algoritmo .....	16
2.4.6. Da Otimização Combinatória à Física .....	17
2.4.7. Aspectos de Construção de Algoritmos SA .....	17
2.4.8. Administração da Temperatura.....	19
2.4.9. Problemas de Otimização com Restrições .....	19
FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E O MÉTODO DE SOLUÇÃO.....	21
3.1. ESTIMADOR DE SUBESTAÇÃO DE MÉDIA TENSÃO .....	21



---

3.2. <i>ESTIMADOR DE ESTADO</i> .....	25
3.2.1. Estimador de Perdas Totais .....	27
3.2.2. Cálculo do Fator de Potência e do Fator de Utilização .....	29
3.2.3. Algoritmo do Estimador de Estado .....	32
ESTUDOS DE CASOS .....	34
4.1 <i>DADOS DE ENTRADA DOS PROGRAMAS</i> .....	34
4.2 <i>ESTIMADOR PARA SUBESTAÇÃO DE MÉDIA TENSÃO</i> .....	36
4.2.1. Resultados Obtidos .....	38
4.3 <i>ESTIMADOR DE ESTADO</i> .....	40
4.3.1. Resultados Obtidos .....	41
4.3.1.1. Alimentador IEEE-13 .....	41
4.3.1.2. Alimentador IEEE-34 .....	42
4.3.1.3. Alimentador AL-34 (Chris et al, 1997) .....	44
4.3.1.4. Alimentador IEEE-37 .....	44
4.3.1.5. Alimentador IEEE-123 .....	45
CONCLUSÕES .....	47
5.1. <i>CONCLUSÕES GERAIS</i> .....	47
5.2. <i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i> .....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
ANEXO 1 .....	56
<i>ALIMENTADOR-TESTE DE 13 BARRAS DO IEEE</i> .....	56
ANEXO 2 .....	58
<i>ALIMENTADOR-TESTE DE 34 BARRAS (Chris et al, 1997)</i> .....	58
ANEXO 3 .....	61
<i>ALIMENTADOR-TESTE DE 34 BARRAS DO IEEE</i> .....	61
ANEXO 4 .....	64
<i>ALIMENTADOR-TESTE DE 37 BARRAS DO IEEE</i> .....	64
ANEXO 5 .....	67
<i>ALIMENTADOR-TESTE DE 123 BARRAS DO IEEE</i> .....	67
ÍNDICE REMISSIVO .....	74

---

## SIMBOLOGIA

$\text{COS}$	Centro de Operações do Sistema;
$\cos\phi$	fator de potência;
$D_m$	demanda máxima de consumidor do grupo A;
$\delta$	ângulo da tensão no início do trecho;
$\Delta E$	diferença de energia entre dois estados $i$ e $j$ ;
$\Delta P$	perdas de potência ativa;
$\Delta P_t$	perdas totais de potência ativa;
$\Delta Q$	perdas de potência reativa;
$\Delta Q_t$	perdas totais de potência reativa;
$E(\cdot)$	função erro entre grandezas medidas e estimadas;
$E_i$	energia de um estado $i$ ;
$\phi$	ângulo entre a potência ativa e a potência aparente;
$f$	função;
$f(x^*)$	função de uma solução ótima $x^*$ ;
$f(x_i)$	função de uma solução qualquer $x_i$ ;
$f_{divGA}$	fator de diversidade de consumidores do grupo A;
$f_{divTD}$	fator de diversidade de transformadores de distribuição;
$f_p$	fator de potência;
$f_{pm}$	fator de potência de consumidor do grupo A;
$f_u$	fator de utilização;
$\gamma$	ângulo da tensão no fim do trecho;
$G_c$	grandeza calculada;
$G_m$	grandeza medida;
GHz	giga hertz;
$I_c$	corrente calculada;
IEEE-13	alimentador-teste de 13 barras do IEEE;
AL-34	alimentador-teste de 34 barras;
IEEE-34	alimentador-teste de 34 barras do IEEE;
IEEE-37	alimentador-teste de 37 barras do IEEE;
IEEE-123	alimentador-teste de 123 barras do IEEE;
$I_{eqp}$	corrente equivalente em perdas;

---

$I_m$	corrente medida;
$j$	operador complexo;
$k$	constante de Boltzmann, $k = 1.380658 \times 10^{-23}$ J/K;
MB	mega bytes;
MSP	método da soma de potências,
$P$	potência ativa;
$P_c$	potência ativa calculada;
$P_0$	potência ativa no início do trecho;
$P_i$	potência ativa de uma carga $i$ ;
$P_L$	carga ativa própria de uma barra;
$P_m$	potência ativa medida;
$P_{ct}$	potência ativa total calculada;
$P_{mt}$	potência ativa total medida na subestação;
$P(\cdot)$	probabilidade associada;
$p(x)$	função de penalidade;
$Q$	potência reativa;
$Q_c$	potência reativa calculada;
$Q_0$	potência reativa no início do trecho;
$Q_i$	potência reativa de uma carga $i$ ;
$Q_L$	carga reativa própria de uma barra;
$Q_m$	potência reativa medida;
$Q_{ct}$	potência reativa total calculada;
$Q_{mt}$	potência reativa total medida na subestação;
$R$	resistência;
$S$	potência aparente;
$S_i$	potência aparente de uma carga $i$ ;
$\hat{S}_i$	potência aparente complexa de uma carga $i$ ;
$S_{Pg}$	somatório das potências ativas de consumidores do grupo A;
$S_{Qg}$	somatório das potências reativas de consumidores do grupo A;
$S_{TD}$	somatório das potências aparentes de transformadores de distribuição;
SA	<i>simulated annealing</i> ;
$T$	temperatura;
$U$	tensão no fim do trecho;

---

---

$V$	tensão no início do trecho;
$V_c$	tensão calculada;
$V_m$	tensão medida;
WLS	Weighted Least Squares – método dos mínimos quadrados ponderados;
$X$	reatância indutiva;
$x^*$	solução ótima;
$x_i$	solução qualquer $i$ no espaço de soluções;
$x_l$	limite inferior do espaço de busca;
$x_h$	limite superior do espaço de busca;
$z_i$	solução qualquer $i$ sem restrições.

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – <i>Trecho de um alimentador radial</i> .....	11
Figura 2.2 – <i>Algoritmo de Metropolis</i> .....	16
Figura 3.1 – <i>Diagrama Unifilar do Barramento de uma Subestação de Média Tensão</i> .....	22
Figura 3.2 – <i>Algoritmo do Estimador de Subestação de Média Tensão</i> .....	24
Figura 3.3 – <i>Alimentador fictício</i> .....	25
Figura 3.4 – <i>Alimentador fictício</i> .....	25
Figura 3.5 – <i>Algoritmo do Estimador de Perdas Totais</i> .....	29
Figura 3.6 – <i>Algoritmo Completo do Estimador de Estado</i> .....	33
Figura 4.1 – <i>Formato dos dados de entrada</i> .....	34
Figura 4.2 – <i>Alimentador-teste de 13 barras do IEEE</i> .....	35
Figura 4.3 – <i>Diagrama Unifilar do Barramento de uma Subestação de Média Tensão</i> .....	36
Figura A.1 – <i>Diagrama unifilar do alimentador IEEE-13</i> .....	56
Figura A.2 – <i>Diagrama unifilar do alimentador AI-34</i> .....	58
Figura A.3 – <i>Diagrama unifilar do alimentador IEEE-34</i> .....	61
Figura A.4 – <i>Diagrama unifilar do alimentador IEEE-37</i> .....	64
Figura A.5 – <i>Diagrama unifilar do alimentador IEEE-123</i> .....	67

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – <i>Exemplo de arquivo de entrada – IEEE-13</i> .....	36
Tabela 4.2 – <i>Resultados obtidos – Janela de Medição 1</i> .....	38
Tabela 4.3 – <i>Resultados obtidos – Janela de Medição 2</i> .....	39
Tabela 4.4 – <i>Resultados obtidos – Janela de Medição 3</i> .....	39
Tabela 4.5 – <i>Resultados obtidos – Alimentador IEEE-13</i> .....	41
Tabela 4.6 – <i>Resultados obtidos – Alimentador IEEE-13</i> .....	42
Tabela 4.7 – <i>Resultados obtidos – Alimentador IEEE-34</i> .....	42
Tabela 4.8 – <i>Resultados obtidos – Alimentador IEEE-34</i> .....	43
Tabela 4.9 – <i>Resultados obtidos – Alimentador AL-34</i> .....	44
Tabela 4.10 – <i>Resultados obtidos – Alimentador IEEE-37</i> .....	44
Tabela 4.11 – <i>Resultados obtidos – Alimentador IEEE-123</i> .....	45
Tabela A.1 – <i>Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-13</i> .....	56
Tabela A.2 – <i>Dados dos nós e dos trechos do alimentador AL-34</i> .....	58
Tabela A.3 – <i>Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-34</i> .....	61
Tabela A.4 – <i>Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-37</i> .....	65
Tabela A.5 – <i>Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-123</i> .....	68

---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

*“Não cessaremos de explorar  
E ao fim de nossa exploração  
Voltaremos ao ponto de partida  
Como se não o tivéssemos conhecido.”*  
T. S. Eliot

### 1.1. MOTIVAÇÃO

A Distribuição de Energia Elétrica requer análise permanente para que o desempenho do sistema seja avaliado de forma a garantir a operação do sistema e a continuidade de serviço, assim como alternativas adequadas de expansão.

Problemas importantes encontrados em sistemas de distribuição são queda de tensão e perdas de energia e de potência. Esses problemas são, essencialmente, problemas de fluxo de carga, embora difiram em alguns aspectos, como nos dados utilizados e na precisão nos resultados (Souza, 1997). Além dos acima mencionados, outros problemas relevantes são novos projetos e expansão do sistema, que requer a previsão da carga futura.

Um trabalho de otimização aplicado a sistemas de distribuição é justificado pelo fato de que é muito vantajoso para as concessionárias de energia terem conhecimento das perdas técnicas de seus alimentadores. Decisões importantes, como recondutoramento, construção de novas subestações e relocação de transformadores de distribuição, podem ser tomadas com base nos resultados da aplicação desses métodos e do conhecimento da rede.

### 1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar uma rotina computacional para estimação de estado de rede de distribuição de energia elétrica empregando o método de otimização *simulated annealing*. Especificamente, desejam-se determinar as perdas técnicas no alimentador primário de distribuição mediante estimação do fator de potência e

do fator de utilização a partir das medições de tensão, corrente e potência em pontos estratégicos.

### 1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As perdas globais de energia em um sistema de distribuição podem ser encontradas subtraindo a energia despachada pela subestação de distribuição, que é geralmente medida, da energia faturada aos consumidores atendidos a partir desta subestação. Apesar de simples, esse método não é fácil de aplicar, pois as medições dos diversos consumidores não ocorrem simultaneamente nem entre si nem em relação à medição da subestação. Além dessa dificuldade, o conhecimento das perdas globais como um todo não é suficiente, pois a quantificação das perdas de energia elétrica segundo o tipo e o componente onde ocorrem é que vai permitir identificar qual ação, e direcionar de forma otimizada os recursos necessários à redução das perdas (Almeida Filho *et al*, 2002).

O interesse das concessionárias de energia pelo conhecimento do estado de um sistema elétrico para avaliação de suas perdas técnicas vem aumentando, tanto pela preocupação com a conservação de energia como, depois das privatizações, com o interesse no faturamento. Diversos métodos de estimação de estado são desenvolvidos para minimização, conhecimento e alocação de perdas e são apresentados com o intuito de conseguir os resultados esperados com os recursos disponíveis.

Várias técnicas de otimização são usadas para resolução de problemas em sistemas de energia elétrica, tanto as clássicas como as heurísticas. Nesse campo, problemas como alocação de medidores para estimação de estado, alocação de capacitores e reconfiguração e expansão de redes com minimização de perdas vêm sendo resolvidos utilizando algoritmos *simulated annealing* com resultados bastante animadores.

Utilizando um algoritmo *simulated annealing*, Pereira *et al*, (1999) desenvolveram um método de minimização de perdas em sistemas de distribuição por modificação dos *taps* de transformadores e alocação de capacitores. Foram apresentados estudos para dois alimentadores, de 24 e 645 barras. No alimentador de 24 barras, os resultados do algoritmo *simulated annealing* coincidiram com resultados obtidos por busca exaustiva, significando que o ótimo global foi encontrado nesse caso.

Com o objetivo de otimizar a supervisão do sistema e auxiliar na estimação de estado, Antonio *et al*, (2001) desenvolveram um algoritmo *simulated annealing* para alocação ótima de medidores. O algoritmo leva em conta o tipo de medição efetuada, a



quantidade mínima respeitada para garantir a observabilidade do sistema e a localização dos medidores, encontrando a solução de menor custo.

O método inicialmente utilizado para estimação de estado em sistemas de potência foi o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (*Weighted Least Squares* - WLS), formulado por Schweppe *et al* (1970). Devido à necessidade de uma grande quantidade de medidas disponíveis em tempo real, o método WLS é mais aplicado a sistemas elétricos de geração e transmissão, visto que, nos sistemas de distribuição, geralmente só há medidores na saída da subestação. Isso exige que o método WLS seja adaptado para que seja aplicável a sistemas de distribuição.

Com o objetivo de trabalhar com um número reduzido de medidas, Roytelman *et al* (1993) desenvolveram um método de estimação de estado para sistemas de distribuição baseado no método dos mínimos quadrados ponderados. Nesse trabalho, as medidas de tensão, potência ativa e potência reativa são transformadas em equivalentes de corrente. A solução é encontrada mediante a minimização, pelo método WLS, do somatório do quadrado da diferença entre as correntes medidas e as estimadas.

Lu *et al* (1995) propõem um algoritmo trifásico para estimação de estado baseado no método da equação normal de Gauss. No método proposto, os termos da jacobiana são obtidos por injeções de corrente em vez de potência. O objetivo é manter a matriz jacobiana invariável com as iterações. Nos estudos de casos apresentados, foi considerado um grande número de medidas em tempo real (12 a 30), todas simuladas pela solução de um fluxo de carga trifásico. De forma geral, em situações reais, as concessionárias não dispõem dessa grande quantidade de medições.

Li (1996) apresenta um método de estimação, baseado no método dos mínimos quadrados ponderados, que utiliza um modelo trifásico da rede elétrica e medidas de tensão, potência ativa e potência reativa. O estimador proposto requer um modelo estocástico de cargas, o qual é influenciado pelas condições climáticas e a variação do tempo. Para obter o modelo estocástico de cargas, são consideradas informações como faturamento mensal, tipo de carga, etc. e são atribuídos erros às cargas que podem variar de 20% a 50%, dependendo do tipo de consumidor. Apresentaram-se estudos de casos para dois alimentadores, um bastante reduzido, de 5 barras, e outro de 20 barras, chamado de alimentador longo. Na prática, os alimentadores reais são constituídos de um número muito maior de nós.

Oliveira *et al* (2001) apresentam um método para determinação das perdas técnicas em sistemas de distribuição, que consiste em dividir o sistema em segmentos (medidor de energia, ramal de ligação, rede secundária, rede primária, transformador de distribuição,

subestação de distribuição e sistema de alta tensão), de modo que perdas diferentes em cada segmento podem ser determinadas. Para cálculo do fluxo de carga, as potências próprias (cargas) nas barras são determinadas por curvas típicas de carga.

Ahn *et al* (2002) apresentam um método de estimação de perdas técnicas em alimentadores, chamado *corrente equivalente em perdas* ( $I_{eqp}$ ), que estima uma corrente correspondente às perdas técnicas equivalentes de um período considerado. Para a determinação de  $I_{eqp}$  é necessário um conjunto de medições de corrente efetuadas no alimentador em teste no período que se quer estimar. Além da grande quantidade de medidas necessárias para estimação de  $I_{eqp}$ , o procedimento estima as perdas máximas do alimentador no período considerado e não há meios de se obterem as perdas em tempo real.

Valle *et al* (2003) propõem um método para determinação das perdas em alimentadores pela utilização de um programa de fluxo de carga. Para isso, é necessário o levantamento das cargas atendidas pelo sistema em supervisão, que é feito por meio de medições, para determinação dos perfis de demanda típica das unidades consumidoras de mesma classe. A determinação de um único perfil típico é feita por meio de medições em vários consumidores de mesma classe. Semelhante ao método proposto por Ahn *et al* (2002), não há como se realizar a estimação das perdas em tempo real e há a necessidade de um grande número de medições disponíveis para a determinação das perdas.

Almeida (2003) desenvolveu um algoritmo para estimação de estado baseado no método da soma de potências. A estimação de estado é feita por seção, partindo da subestação para os ramais, de forma que as grandezas estimadas em uma seção sejam usadas como pseudomedições para a seção subsequente. O *estimador soma de potências* emprega o método dos mínimos quadrados ponderados (WLS) (Schweppe *et al*, 1970). As pseudomedições de potência ativa e reativa são obtidas a partir de fatores de potência típicos ou históricos e fatores de utilização calculados (Almeida *et al*, 2003). Com o resultado da estimação (tensões nas barras e ângulos de defasagem), estimam-se as potências ativas e reativas nas barras e as perdas técnicas do alimentador.

#### **1.4. COMPOSIÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, descritos a seguir:

No capítulo de introdução são apresentados a motivação, os objetivos e uma breve revisão bibliográfica de trabalhos relacionados com o tema da dissertação. No segundo capítulo faz-se uma revisão teórica sobre estimação de estado, estimação de perdas, método

da soma de potências e *simulated annealing* e no terceiro capítulo é formulado o problema e uma solução é proposta.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos estudos de casos e no quinto, as principais conclusões do trabalho.

Os dados dos alimentadores usados para teste e validação do programa computacional desenvolvido são apresentados nos anexos.

---

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1. ESTIMAÇÃO DE ESTADO

A operação de uma rede elétrica requer o conhecimento constante da situação do sistema. Para isso, o Centro de Operações do Sistema (COS) recebe continuamente medidas provenientes da rede, contendo informações sobre tensões nas barras de carga e de geração, fluxo de potência ativa e reativa nas linhas.

O problema de conhecimento da situação da rede consiste em: conhecidas  $n$  medidas independentes e os dados da rede, determinar os valores das grandezas elétricas que não foram medidas.

A *estimação de estado* pode ser definida como o processo de obtenção do estado de um sistema a partir de um conjunto de medidas, conhecidos seus parâmetros e sua topologia (Dorado, 2001). Ou seja, a partir dos dados topológicos e de  $n$  medidas simultâneas da rede elétrica, calcula-se o seu vetor de estado (tensões de barra).

As medidas (ou pseudomedidas) que se podem considerar são:

- Módulo da tensão em uma barra;
- Módulo da corrente na entrada do alimentador;
- Potência ativa em barras e linhas;
- Potência reativa em barras e linhas.

As pseudomedições de potência ativa e reativa nas barras com transformador de distribuição são construídas a partir das equações (Medeiros Jr. *et al*, 2002):

$$P_i = S_i f_u f_p \quad (2.1)$$

$$Q_i = S_i f_u \sqrt{1 - f_p^2} \quad (2.2)$$

em que  $S_i$ ,  $f_u$  e  $f_p$  são, respectivamente, a potência nominal do transformador, o fator de utilização e o fator de potência.

A função do estimador de estado é determinar o estado do sistema a partir da minimização de uma *função-custo* que leva em consideração as grandezas medidas. As variáveis que representam o estado do sistema são as tensões nas barras, os ângulos, o fluxo

de potência ativa e reativa nas linhas, o fluxo de corrente nas linhas e as perdas no alimentador (Gouvêa *et al*, 1998).

### **2.1.1. Métodos de Estimação de Estado**

O problema de estimação de estado baseado em estudos de fluxo de carga, tendo sua solução obtida pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, foi inicialmente formulado por Schweppe (Schweppe *et al*, 1970). O método pode ser visto com mais detalhes em (Monticelli, 2000).

O Estimador de Estado de Corrente Proporcional é um método de estimação de estado de alimentador de distribuição feito por meio de um programa de fluxo de carga que permite ajustes nas potências injetadas nos nós, de modo que a corrente calculada na entrada do alimentador convirja para a corrente medida de acordo com uma tolerância pré-estabelecida (Almeida, 2003). Para executar o programa de fluxo de carga, é necessário estimar a demanda efetiva nas barras do alimentador.

Outra maneira usual de estimação de estado é utilizar um programa de fluxo de carga para retornar os valores das tensões de barra. Para isso, é necessário estimar a demanda efetiva nas barras do alimentador, da mesma forma que o método da *corrente proporcional*. Em alimentadores de distribuição, onde não se conhecem os fatores de potência e de utilização das cargas, tal estimação é difícil e, normalmente, utilizam-se valores máximos de carregamento do alimentador, utilizando os valores de demanda máxima dos consumidores do grupo A e valores de fator de potência e de utilização típicos. Como os estimadores estão sendo executados em tempo real, utilizando medições que podem ter sido obtidas em qualquer condição de carregamento do alimentador, os resultados obtidos podem se afastar da realidade apresentada pelo sistema no momento da estimação.

## **2.2. PERDAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

O conhecimento a qualquer momento dos níveis das perdas técnicas no sistema de energia elétrica permite, por meio da comparação com as perdas totais, avaliar a presença e importância das perdas comerciais, que são um forte item na queda da receita das empresas distribuidoras de energia, e a elaboração de planos de ação para diminuição dessas perdas (Soares *et al*, 1999).

A diminuição das perdas é de fundamental importância não somente para gerar lucros, mas também para efeito de conservação de energia, já que a redução das perdas implica em uma menor capacidade de geração necessária para atender à mesma carga (Manhaes *et al*, 2003).

### 2.2.1. Identificação e Classificação das Perdas

As perdas podem ser classificadas quanto à *natureza, origem e localização* (Soares *et al*, 1999):

1. *Quanto à Natureza:*

- a. *Perda de Energia (kWh)*: diferença existente entre a energia de entrada e a energia de saída em um intervalo de tempo.

2. *Quanto à Origem:*

- a. *Perda Técnica*: energia ou demanda perdida no transporte e na transformação (inerente ao processo) e que ocorre antes do ponto de entrega. As perdas técnicas no sistema de Distribuição incluem as perdas resistivas na rede primária, nos transformadores de distribuição e na rede secundária, as perdas nos núcleos dos transformadores e as perdas nos medidores de energia.
- b. *Perda Comercial*: energia ou demanda efetivamente entregue ao consumidor, ao consumo próprio ou a outra concessionária que não foi contabilizada.

3. *Quanto à Localização:*

- a. *Perdas Globais*: perdas totais de energia e demanda, considerando o conjunto dos sistemas de Geração, Transmissão e Distribuição.
- b. *Perdas na Transmissão*: perdas de energia e demanda, considerando o conjunto dos sistemas de Geração e Transmissão.
- c. *Perdas na Distribuição*: perdas de energia e demanda, considerando apenas o sistema de Distribuição.

### 2.2.2. Custo das Perdas

Em termos gerais, o custo de uma certa parcela de perdas existente num sistema elétrico é, em cada momento, igual ao benefício que seria obtido se essa parcela fosse anulada.

Para os sistemas de geração e de transmissão, as perdas em um trecho do sistema de distribuição representam uma carga adicional que é suprida em igualdade de condições com as cargas dos consumidores. Assim sendo, o benefício de evitar uma unidade de perdas é numericamente igual ao custo de fornecer uma unidade adicional de carga, ou, o que é equivalente, o custo das perdas é igual ao custo do fornecimento.

### 2.2.3. Cálculo das Perdas em Alimentadores de Distribuição

O procedimento mais comum de cálculo de perdas em alimentadores é a utilização de um programa computacional de fluxo de carga. Para isso, é necessário conhecer os dados topológicos do alimentador, seus parâmetros e as potências próprias (demanda efetiva) nas barras. Em um alimentador radial, normalmente as barras são de carga, exceto a da subestação, que é a barra de balanço. São conhecidos os parâmetros do alimentador (sua impedância), a topologia e a potência instalada em cada barra, em kVA. Entretanto, de modo geral, a demanda efetiva das barras do alimentador é desconhecida.

Independente do método de fluxo de carga utilizado, a qualidade da estimativa das perdas depende da exatidão com que se conhecem os fatores de potência e de utilização nas barras de carga. Os modos usuais de determinação desses fatores são:

- Pela curva de carga do alimentador como um todo (Souza *et al*, 2004);
- Considerando curvas de carga típicas (Alves *et al*, 2004).

Além dos modos acima mencionados, pode-se usar um método de otimização para estimar os fatores de potência e de utilização das barras do alimentador.

#### 2.2.3.1. Pela Curva de Carga do Alimentador

As perdas em alimentadores de distribuição são usualmente calculadas com o auxílio de um programa de fluxo de carga, com base na curva de carga levantada na saída da subestação, ou seja, supõe-se que todas as curvas de cargas individuais são similares à curva de carga do alimentador como um todo (Souza *et al*, 2004). O método consiste em

tomar o valor máximo de potência ativa observado na curva, e o valor de potência reativa verificado no mesmo instante, e calcular um fator de potência e um fator de utilização da seguinte forma:

$$f_p = \frac{P_m}{\sqrt{P_m^2 + Q_m^2}} \quad (2.3)$$

$$f_u = \frac{\sqrt{P_m^2 + Q_m^2}}{\sum_{j=1}^{n_t} S_j + \sum_{k=1}^{n_g} \frac{D_{mk}}{f_{pmk}}} \quad (2.4)$$

em que:

$f_u$  é o fator de utilização;

$f_p$  é o fator de potência;

$P_m$  é a potência ativa máxima;

$Q_m$  é a potência reativa máxima;

$S_j$  é a potência nominal de cada transformador de distribuição,  $j=1,2,...,n_t$ ;

$n_t$  é o número de transformadores de distribuição;

$D_{mk}$  é a demanda máxima de consumidor do grupo A,  $k=1,2,...,n_g$ ;

$f_{pmk}$  é o fator de potência de consumidor do grupo A,  $k=1,2,...,n_g$ ;

$n_g$  é o número de consumidores do grupo A.

Os fatores de potência e de utilização encontrados dessa maneira são atribuídos a todas as cargas e as potências ativas e reativas próprias das barras são calculadas por meio das equações (2.1) e (2.2). Executa-se, então, um programa de fluxo de carga que retornará os valores das perdas e das tensões de barra.

### 2.2.3.2. Pela Curva de Carga Típica

Outro método de estimação da demanda efetiva nas barras é utilizar a curva de carga típica, definida pelo perfil de carga dos consumidores. Baseando-se em medições, os perfis de carga são divididos em grupos de consumidores típicos (Alves *et al*, 2004). As curvas diárias dos grupos consumidores são obtidas por meio de tratamento estatístico desses valores medidos.



### 2.2.3.3. Estimação das Perdas

Uma maneira de determinarem-se os fatores de potência e de utilização das cargas de um alimentador é por estimação, empregando-se, para isso, um método de otimização. É sobre isso que versa esta dissertação. O método de otimização aplicado neste trabalho é o *simulated annealing*.

## 2.3. O MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS

O *Método da Soma de Potências* (MSP) é o método para fluxo de carga mais usado para sistemas de distribuição radiais (Cespedes, 1990), pois apresenta melhor convergência, mesmo em caso de sobrecargas do sistema. Sistemas em anel devem ser convertidos, para efeito de cálculo, em sistemas radiais pelo método da abertura do anel.

Inicialmente, considere um único trecho de um alimentador radial identificado pela sua barra de origem e sua barra de destino.

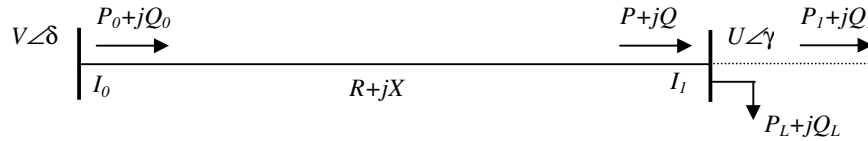


Figura 2.1 – Trecho de um alimentador radial.

Na figura 2.1,  $V\angle\delta$  e  $U\angle\gamma$  são as tensões nas barras inicial e final do trecho, respectivamente. O trecho apresenta uma impedância  $R + jX$  e em sua barra final existe uma carga determinada por  $P_L + jQ_L$ . A potência no início do trecho é  $P_0 + jQ_0$  e a potência transmitida ao trecho seguinte é  $P_1 + jQ_1$ . Ao longo do trecho são consideradas as perdas de potência ativa e reativa,  $\Delta P$  e  $\Delta Q$ , respectivamente. Note que:

$$P = P_0 - \Delta P \quad (2.5.a)$$

$$Q = Q_0 - \Delta Q \quad (2.5.b)$$

Assim, a potência transmitida ao trecho seguinte é dada por:

$$P_1 = P - P_L \quad (2.6.a)$$

$$Q_1 = Q - Q_L \quad (2.6.b)$$

Considere conhecidos os valores de  $P$ ,  $Q$  e  $V$  necessários para encontrar o valor da tensão no final do trecho. Da figura 2.1, temos as seguintes expressões (Das *et al*, 1994):

$$I_0 = \frac{V\angle\delta - U\angle\gamma}{R + jX} \quad (2.7)$$

$$P - jQ = U^* \cdot I_0 \quad (2.8)$$

Substituindo (2.7) em (2.8):

$$\frac{P - jQ}{U^*} = \frac{V\angle\delta - U\angle\gamma}{R + jX} \quad (2.9)$$

Seja:

$$U^* = U\angle -\gamma \quad (2.10)$$

Então, a equação (2.9) torna-se:

$$V \cdot U\angle(\delta - \gamma) - U^2 = (R + jX) \cdot (P - jQ) \quad (2.11)$$

Transformando para a forma retangular e separando parte real e parte imaginária, temos (Cespedes, 1990):

$$V \cdot U \cdot \cos(\delta - \gamma) = U^2 + P \cdot R + Q \cdot X \quad (2.12.a)$$

$$V \cdot U \cdot \sin(\delta - \gamma) = P \cdot X - Q \cdot R \quad (2.12.b)$$

Elevando ao quadrado e somando as equações (2.12) chegamos à seguinte equação, biquadrada na variável  $U$ :

$$U^4 + 2 \cdot (R \cdot P + X \cdot Q - \frac{1}{2} \cdot V^2) \cdot U^2 + (R^2 + X^2) \cdot (P^2 + Q^2) = 0 \quad (2.13)$$

Que pode ser escrita de maneira mais conveniente como:

$$U^4 + 2AU^2 + C = 0 \quad (2.14)$$

Para calcular  $U$ , definem-se as variáveis auxiliares  $A$ ,  $B$  e  $C$ :

$$A = RP + XQ - \frac{1}{2}V^2 \quad (2.15.a)$$

$$C = (R^2 + X^2)(P^2 + Q^2) \quad (2.15.b)$$

$$B = \sqrt{A^2 - C} \quad (2.15.c)$$

A tensão  $U$  no final do trecho é calculada por:

$$U = \sqrt{B - A} \quad (2.16)$$

Finalmente, podem ser calculadas as perdas de potência no trecho (Das *et al*, 1994):

$$\Delta P = R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (2.17.a)$$

$$\Delta Q = X \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (2.17.b)$$

Para o alimentador completo a solução é obtida iterativamente. O algoritmo é composto dos seguintes procedimentos:

1. Considerar nulas as perdas de potência ativa e reativa em todos os trechos;
2. Calcular os fluxos de potência ( $P+jQ$ ) partindo-se do último trecho até atingir o primeiro trecho (trecho da subestação), utilizando as equações (2.5) e (2.6) em conjunto;
3. Em seguida, para o trecho da subestação, calcular os valores das variáveis auxiliares  $A$  e  $C$  (equações 2.15.a e 2.15.b);
4. Calcular o valor da variável auxiliar  $B$  (equação 2.15.c);
5. Calcular a tensão  $U$  (equação 2.16);
6. Calcular as perdas de potência  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  no respectivo trecho (equações 2.17.a e 2.17.b);
7. Repetir os passos de 3 a 6, passando por todos os trechos;
8. Repetir os passos de 2 a 7, até que não haja variação significativa nas perdas totais do alimentador de uma iteração em relação à outra.

## 2.4. SIMULATED ANNEALING

### 2.4.1 Otimização Combinatória

Problemas de otimização são caracterizados por situações em que se deseja minimizar (ou maximizar) uma função de várias variáveis, sujeita a restrições. De acordo com os tipos de variáveis do problema, resultam duas classes: problemas contínuos e problemas discretos ou combinatórios. Nos problemas contínuos, procura-se, em geral, como solução, um conjunto de números reais ou uma função; nos problemas combinatórios, está-se interessado em encontrar um *objeto* que corresponda ao resultado desejado. Este *objeto* pode ser um arranjo, agrupamento ou seleção de números discretos, usualmente em número finito.

A solução de um problema de otimização combinatória corresponde à identificação de uma *solução ótima*  $x^*$  (mínimo ou máximo), pertencente ao *espaço de soluções*  $X$ , tal que:

$$f(x^*) \leq f(x_i) \quad \forall x_i \in X \quad (2.18)$$

em que  $f : X \rightarrow \Re$  é a *função-objetivo* ou *função-custo*.

As estratégias de resolução de problemas de otimização consistem em dois tipos de abordagem: as técnicas *clássicas* e as *heurísticas*.

As técnicas clássicas são confiáveis e possuem aplicações nos mais variados campos da engenharia e das ciências, porém podem apresentar problemas se a função objetivo ou suas derivadas forem descontínuas. Além disso, as técnicas clássicas podem convergir para mínimos ou máximos locais, às vezes muito diferentes do ótimo global.

Os métodos heurísticos, com busca randômica controlada por critérios probabilísticos, reaparecem como uma forte tendência nos últimos anos, principalmente devido ao avanço nos recursos computacionais, pois um fator limitante desses métodos é o número excessivo de avaliações da função-objetivo (Saramago, 2003).

#### **2.4.2. Heurística e Metaheurística**

*Heurística*, termo associado à arte de inventar, é um processo criativo usado na resolução de problemas para os quais não existe algoritmo. Estas estratégias geralmente conduzem a soluções de boa qualidade, embora não haja garantia de serem ótimas (Anjo, 1999).

As *Metaheurísticas* associam dois ingredientes fundamentais: a boa resposta das heurísticas a problemas de difícil resolução e a inspiração em outros métodos com objetivos semelhantes, embora em contextos diferentes. São exemplos de metaheurísticas:

- *Algoritmos Genéticos*: utilizando a teoria da seleção natural e conceitos da genética;
- *Colônia de Formigas*: baseados na organização dos formigueiros;
- *Redes Neurais*: baseados no funcionamento do cérebro;
- *Simulated Annealing*: baseados na tempera de metais e na formação de cristais.

#### **2.4.3. Mecânica Estatística**

A Mecânica Estatística é uma parte da Física da Matéria Condensada que estuda o comportamento de sistemas macroscópicos de partículas com o objetivo de entender as propriedades da matéria. Para tanto, é necessário compreender como as interações entre as partículas microscópicas do sistema determinam seu comportamento macroscópico (Gerl *et al*, 1970).

Uma questão fundamental em Mecânica Estatística diz respeito ao comportamento de um sistema passando por altas temperaturas até atingir o equilíbrio térmico (no limite do resfriamento): se os átomos estarão em estado líquido ou sólido e, caso atinjam o estado

sólido, se formarão uma estrutura cristalina estável ou assumirão um estado amorfo, onde os átomos se encontram com nível de energia muito superior ao do cristal perfeito (Kirkpatrick *et al*, 1983). Esse processo, em que a temperatura ocupa um lugar de destaque, é conhecido como *têmpera* (*annealing*).

Sucintamente, a *têmpera* de um metal consiste na diminuição da energia interna das partículas que o constituem, ou seja, as partículas do metal vão ocupando diferentes posições até encontrarem uma disposição em que a energia seja mínima. Num primeiro momento, o metal é submetido a uma temperatura suficientemente elevada para que ele atinja o seu ponto de fusão. Numa segunda fase, o metal é deixado nesse nível de temperatura durante um longo período de tempo de modo que os átomos ocupem diversas posições e o equilíbrio térmico seja alcançado nessa temperatura. Alcançado o equilíbrio, a temperatura é reduzida e o metal é novamente deixado durante um longo tempo nessa nova temperatura até o equilíbrio térmico ser alcançado. De acordo com o controle da diminuição da temperatura, o resultado final pode ser um cristal, com átomos dispostos segundo uma rede cristalina, se o arrefecimento foi cuidadoso, ou uma estrutura amorfa provocada pelo resfriamento rápido ou pela não obtenção do equilíbrio térmico (Anjo, 1999).

#### **2.4.4. Da Física à Otimização Combinatória**

Em 1953, Nicholas Metropolis (Metropolis *et al*, 1953 *apud* Kirkpatrick *et al*, 1983), do *Los Alamos Scientific Laboratory*, simulou a obtenção do equilíbrio térmico, utilizando um algoritmo que ficou conhecido como *Algoritmo de Metropolis*. Com ele, é possível observar os diferentes estados pelos quais passa o conjunto de átomos até atingir o estado de equilíbrio.

No início dos anos 80, Scott Kirkpatrick e seus colaboradores, C. D. Gelatt e M. P. Vecchi, dos laboratórios da IBM, notaram que o processo da *têmpera* era muito semelhante, nos seus objetivos, à resolução de um problema de otimização.

O processo da *têmpera*, modelado por Metropolis, tem a seguinte forma:

Dado um estado  $i$  com energia  $E_i$ , gera-se, por meio de um mecanismo de perturbação, um estado  $j$  com energia  $E_j$ . Se a diferença de energia  $\Delta E = E_j - E_i$  for menor ou igual a zero, ( $\Delta E \leq 0$ ), então o estado  $j$  é aceito como corrente. Caso contrário,

$(\Delta E > 0)$ , é associada uma probabilidade de aceitação,  $P(\Delta E)$ , ao estado  $j$ , que será aceito mediante o seguinte critério de aceitação:

$$P(\Delta E) = e^{-\Delta E/kT} \quad (2.19)$$

em que  $k$  é a constante de Boltzmann.

#### 2.4.5. Algoritmo

O algoritmo de Metropolis é apresentado no fluxograma da figura 2.2, abaixo:

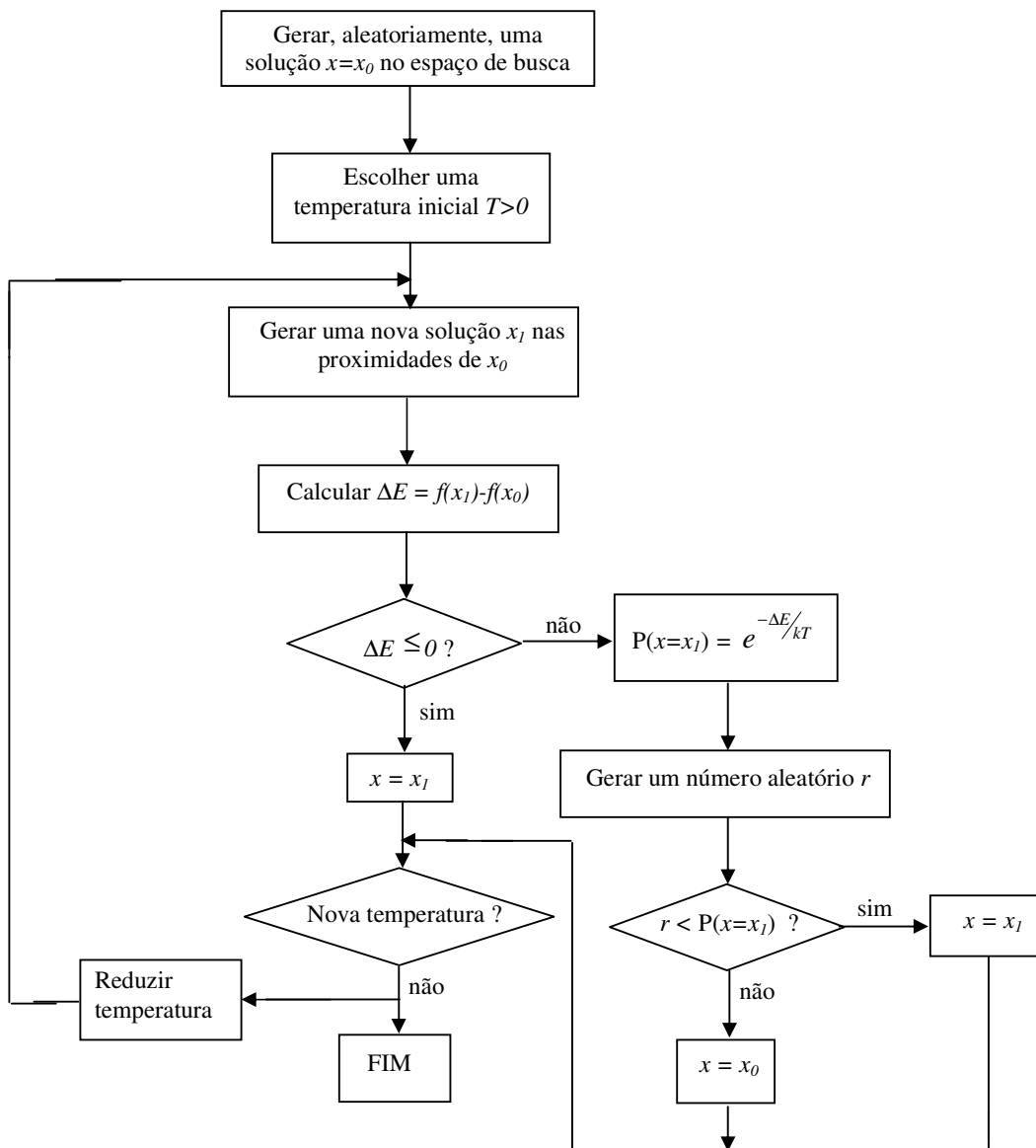


Figura 2.2 – Algoritmo de Metropolis.

#### 2.4.6. Da Otimização Combinatória à Física

A analogia do processo modelado por Metropolis com o *simulated annealing* (SA), utilizado na resolução de problemas de otimização combinatória, é estabelecida da seguinte forma:

- Os estados do sistema (diversas posições ocupadas pelos átomos) são equivalentes às soluções do problema de otimização;
- A cada estado equivale um valor de energia;
- A energia de um estado é equivalente ao custo de uma solução (valor da função-objetivo naquele ponto-solução);
- A estrutura cristalina resultante do equilíbrio térmico obtido pelo resfriamento cauteloso é equivalente à solução ótima.

O processo de busca por uma solução ótima em um problema de minimização pode ser descrito da seguinte forma:

No início do processo da têmpera (quando o metal se encontra na temperatura de fusão), os átomos se encontram em estado desordenado, ocupando várias posições; em um problema de otimização, isso significa que o algoritmo está "passeando" pelas várias soluções dentro do espaço de busca. Como a temperatura é muito elevada, a probabilidade de aceitação de uma solução que aumente o valor da função-objetivo,  $P(\Delta E) = e^{-\Delta E/kT}$ , é muito grande e praticamente todas as soluções desse tipo são aceitas a altas temperaturas. Esse processo de aceitação de soluções ruins tem o propósito de fugir dos ótimos locais. À medida que a temperatura decresce, os átomos ficam menos desordenados, até que, no limite do resfriamento, tendo alcançado equilíbrio térmico, formem uma estrutura cristalina. No problema de otimização, isso significa que, com a diminuição da temperatura, a probabilidade de aceitação  $P(\Delta E)$  vai diminuindo até que seu valor seja tal que nenhuma solução ruim será aceita. No final do processo ( $T=0$ ), espera-se que tenha sido encontrada a solução ótima ou muito próxima a ela.

#### 2.4.7. Aspectos de Construção de Algoritmos SA

Na construção de algoritmos SA é importante a especificação de alguns parâmetros, como: valores inicial e final de temperatura, número de iterações e regra de decréscimo de temperatura, os quais definem a estratégia de resfriamento.

Esses algoritmos decompõem-se em duas grandes buscas sobrepostas: a busca externa controla o término do processo e baseia-se na noção de estado resfriado; a busca interna contém o processo de otimização. Para uma temperatura fixada, explora-se a vizinhança aceitando ou não os movimentos que são apresentados. Ao fim de  $n$  iterações, diminui-se a temperatura. A escolha de  $n$  se dá pelo contexto do problema a ser otimizado e é, geralmente, empírica.

Para calcular os valores inicial e final de temperatura a serem utilizados é necessário algum conhecimento do valor da função na vizinhança da solução. A determinação das temperaturas inicial e final é feita com base na probabilidade de aceitação. Em geral, se um determinado acréscimo no valor inicial da função-custo  $\Delta E_i$  é aceito com probabilidade  $P_i$ , a temperatura inicial é:

$$T_i = -\frac{\Delta E_i}{\ln(P_i)} \quad (2.20)$$

Para efetuar o cálculo acima, deve ser determinada pelo usuário a probabilidade de aceitação de um certo acréscimo na função-objetivo. Por exemplo: se na temperatura inicial soluções que aumentam o custo da função em 50 são aceitas com probabilidade de 0,5 (50%), a temperatura inicial será:

$$T_i = -\frac{50}{\ln(0,5)} = 72,135$$

Se na temperatura final uma solução que aumenta o custo em 10 é aceita com probabilidade de 0,05 (5%), a temperatura final será:

$$T_i = -\frac{10}{\ln(0,05)} = 3,338$$

Se estiver sendo usada alguma função de penalidade, o valor da penalidade não deverá ser adicionado ao cálculo das temperaturas.

Não havendo conhecimento a respeito do valor da função-custo, pode-se determinar a temperatura inicial de forma empírica. Para isso escolhe-se um valor que pareça ser alto, executa-se o algoritmo por um tempo curto e observa-se a taxa de aceitação. Se esta taxa for adequadamente alta, o valor testado para temperatura pode ser usado. Podem ser considerados como taxas de aceitação alta valores de 50% a 70%. Quanto à *temperatura final*, na teoria, o processo deveria continuar até que a temperatura fosse igual a zero. Na prática, é suficiente que a parada ocorra quando a chance de haver aumentos na função-custo (para minimização) seja negligenciável (Izquierdo, 1998).



Outro aspecto importante é a definição do número de iterações que deverão ocorrer em cada temperatura, ou seja, quantas perturbações na solução corrente deverão ocorrer em cada valor de temperatura. Isso também pode ser obtido empiricamente.

#### 2.4.8. Administração da Temperatura

Para que o SA convirja e resulte em uma solução ótima ou muito próxima do ótimo é necessário que haja uma administração da diminuição da temperatura. Vários critérios de diminuição da temperatura podem ser encontrados na literatura (Kirkpatrick *et al*, 1983) (Anjo, 1999) (Noronha *et al*, 2001). Foram testados neste trabalho os três métodos a seguir:

1. *Descida Exponencial*: sejam  $T_i, T_f$ , as temperaturas inicial e final, respectivamente,  $iT$  a quantidade de iterações para esfriamento e seja  $k$  a iteração corrente, a diminuição da temperatura é feita segundo o seguinte critério:

$$T_{k+1} = \alpha_e T_k \quad (2.21)$$

em que:

$$\alpha_e = e^{\frac{\ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)}{iT}} \quad (2.22)$$

2. *Descida Linear*:

$$T_{k+1} = T_k - \alpha_l$$

em que:

$$\alpha_l = \frac{T_i - T_f}{iT} \quad (2.23)$$

3. *Descida Aritmética*:

$$T_{k+1} = T_i + \left( \frac{T_f - T_i}{iT} \cdot k \right) \quad (2.24)$$

#### 2.4.9. Problemas de Otimização com Restrições

Para trabalhar com problemas restritos utilizando o algoritmo SA, podem ser utilizadas as duas técnicas mais comuns a seguir:

1. *Método da rejeição das configurações não-viáveis*: a cada nova perturbação da solução corrente é verificado se as variáveis geradas satisfazem às restrições impostas, caso contrário, geram-se novo vetor de posição com novas variáveis dentro do espaço de busca, as quais irão substituir as soluções não-viáveis. Este método é muito eficiente, embora lento (Faria *et al*, 2003). Uma variante do método consiste em substituir as soluções não-viáveis pelo valor de fronteira (valor da restrição imposta).
2. *Método da transformação de variáveis*: uma solução  $z_0$  sem restrições é gerada e é dada uma perturbação nessa solução, gerando uma solução  $z_l$  também sem restrições. Esses dois pontos são, então, transformados em soluções viáveis por meio da seguinte transformação de variáveis:

$$x_i = x_l + (x_h - x_l) \cdot \sin^2(z_i) \quad (2.25)$$

em que:

$x_i$  é a transformada da solução  $z_i$  dentro do espaço de busca;

$x_l$  é o limite inferior do espaço de busca;

$x_h$  é o limite superior do espaço de busca.

---

## CAPÍTULO 3

### FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E O MÉTODO DE SOLUÇÃO

Tal como foi formulado no capítulo 2, o método da soma de potências (MSP) é o mais indicado para calcular o fluxo de carga em alimentadores radiais. Calcular as perdas de potência e as tensões de barras com um programa de fluxo de carga MSP não oferece dificuldades quando são conhecidos o fator de potência, o fator de utilização e a potência instalada em cada barra do alimentador. Na prática, entretanto, isso não se verifica, e, na maioria das vezes, a única informação disponível é a potência do transformador de distribuição instalado em cada barra. Desta forma, o problema apresentado nesta dissertação pode ser enunciado da seguinte forma: realizar a estimação de estado de um alimentador de distribuição, determinando suas tensões de barra e suas perdas totais, desconhecendo o fator de potência e o fator de utilização nas barras do alimentador.

Para resolver o problema proposto, um algoritmo *simulated annealing* (SA) foi combinado com o método de fluxo de carga MSP para a estimação do estado (tensões nas barras) e das perdas totais de um sistema de distribuição de energia elétrica. O método proposto foi aplicado a sistemas de 13, 34, 37 e 123 barras do IEEE (Kersting, 1991) (Kersting, 2000) e de 34 barras (Chris *et al*, 1997). Os dados dos alimentadores encontram-se nos anexos e os resultados das simulações são apresentados no próximo capítulo.

Além do estimador de estado (programa principal), outro algoritmo *simulated annealing* foi implementado para realizar a estimação de subestações de média tensão. Esse algoritmo estima as potências ativa e reativa na entrada de alimentadores que não dispõem de tal medição. O estimador de subestação de média tensão é importante na determinação das grandezas que servem de entrada para o programa principal.

#### 3.1. ESTIMADOR DE SUBESTAÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

O programa de fluxo de carga (MSP) associado ao estimador implementado na seção seguinte necessita das potências ativa e reativa na entrada do alimentador em estudo. Como geralmente as concessionárias de distribuição de energia dispõem de poucos

medidores de potência, a maioria dos alimentadores possui apenas medições de corrente na entrada dos alimentadores, de tensão no barramento da subestação e de potência total na subestação. O algoritmo proposto nesta seção calcula as potências ativa e reativa na entrada do alimentador que se deseja supervisionar a partir da estimação dos fatores de potência dos alimentadores da subestação de média tensão.

O estimador de subestação é um algoritmo *simulated annealing* cujos pontos-solução são os fatores de potência dos alimentadores e cuja função-objetivo a ser minimizada é o somatório dos erros entre as grandezas medidas (corrente, tensão, potência ativa e potência reativa) e as grandezas calculadas no programa.

Pode ser visto, na figura 3.1, um exemplo de configuração de saída de uma subestação de média tensão para  $n$  alimentadores (Almeida, 2003):

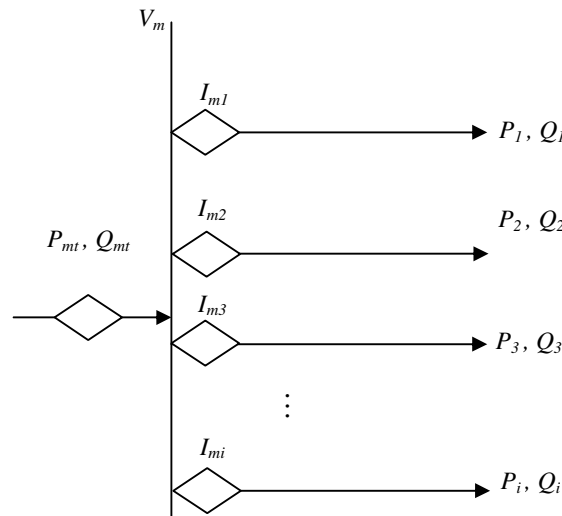


Figura 3.1 – Diagrama Unifilar do Barramento de uma Subestação de Média Tensão

em que:

$P_{mt}$  é a potência ativa total trifásica medida no barramento;

$Q_{mt}$  é a potência reativa total trifásica medida no barramento;

$V_m$  é a tensão de linha medida no barramento;

$I_{mi}$  é a corrente de linha medida na entrada do alimentador  $i$ ,  $i=1,2,...,n$ ;

$P_i$  é a potência ativa total trifásica na entrada do alimentador  $i$ ,  $i=1,2,...,n$ ;

$Q_i$  é a potência reativa total trifásica na entrada do alimentador  $i$ ,  $i=1,2,...,n$ .

As potências ativas e reativas calculadas nas entradas dos alimentadores,  $(P_{ci}, Q_{ci}, i=1,2,...,n)$  são dadas pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
 P_{c1} &= \sqrt{3} \cdot V_m \cdot I_{m1} \cdot f_{p1} \\
 P_{c2} &= \sqrt{3} \cdot V_m \cdot I_{m2} \cdot f_{p2} \\
 &\vdots \\
 P_{ci} &= \sqrt{3} \cdot V_m \cdot I_{mi} \cdot f_{pi}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{c1} &= \sqrt{3} \cdot V_m \cdot I_{m1} \cdot \sqrt{1 - f_{p1}^2} \\
 Q_{c2} &= \sqrt{3} \cdot V_m \cdot I_{m2} \cdot \sqrt{1 - f_{p2}^2} \\
 &\vdots \\
 Q_{ci} &= \sqrt{3} \cdot V_m \cdot I_{mi} \cdot \sqrt{1 - f_{pi}^2}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

As potências totais calculadas no barramento da subestação,  $P_{ct}$ ,  $Q_{ct}$ , são dadas pelo somatório das potências calculadas nas entradas dos alimentadores, ou seja:

$$P_{ct} = \sum_{i=1}^n P_{ci} \tag{3.3}$$

$$Q_{ct} = \sum_{i=1}^n Q_{ci} \tag{3.4}$$

As correntes calculadas nas entradas dos alimentadores são dadas em função das potências calculadas nos alimentadores e da tensão medida no barramento, da seguinte forma:

$$I_{ci} = \frac{\sqrt{P_{ci}^2 + Q_{ci}^2}}{\sqrt{3} \cdot V_m} \tag{3.5}$$

A tensão calculada no barramento,  $V_c$ , é dada em função das correntes medidas nas entradas dos alimentadores e das potências totais calculadas:

$$V_c = \frac{\sqrt{P_{ct}^2 + Q_{ct}^2}}{\sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^n I_i} \tag{3.6}$$

A função-objetivo,  $E(f_p)$ , a ser minimizada é:

$$E(f_p) = 0,5 \cdot \sqrt{(V_m - V_c)^2 + (I_m - I_c)^2 + (P_{mt} - P_{ct})^2 + (Q_{mt} - Q_{ct})^2} \tag{3.7}$$

O algoritmo inicia com uma estimativa aleatória ( $f_{p0}$ ) dos fatores de potência,  $f_{pi}$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , que gerarão as potências ativas e reativas calculadas, dadas pelas equações (3.1) e (3.2). É dada uma perturbação na solução inicial  $f_{p0}$ , ou seja, encontra-se outra solução  $f_{p1}$  nas proximidades de  $f_{p0}$ , e calcula-se o valor de  $E(f_p)$  pela equação (3.7) nesses dois pontos.

A partir daí, segue o algoritmo de Metropolis básico. O algoritmo do estimador de subestação de média tensão pode ser visto na figura 3.2:

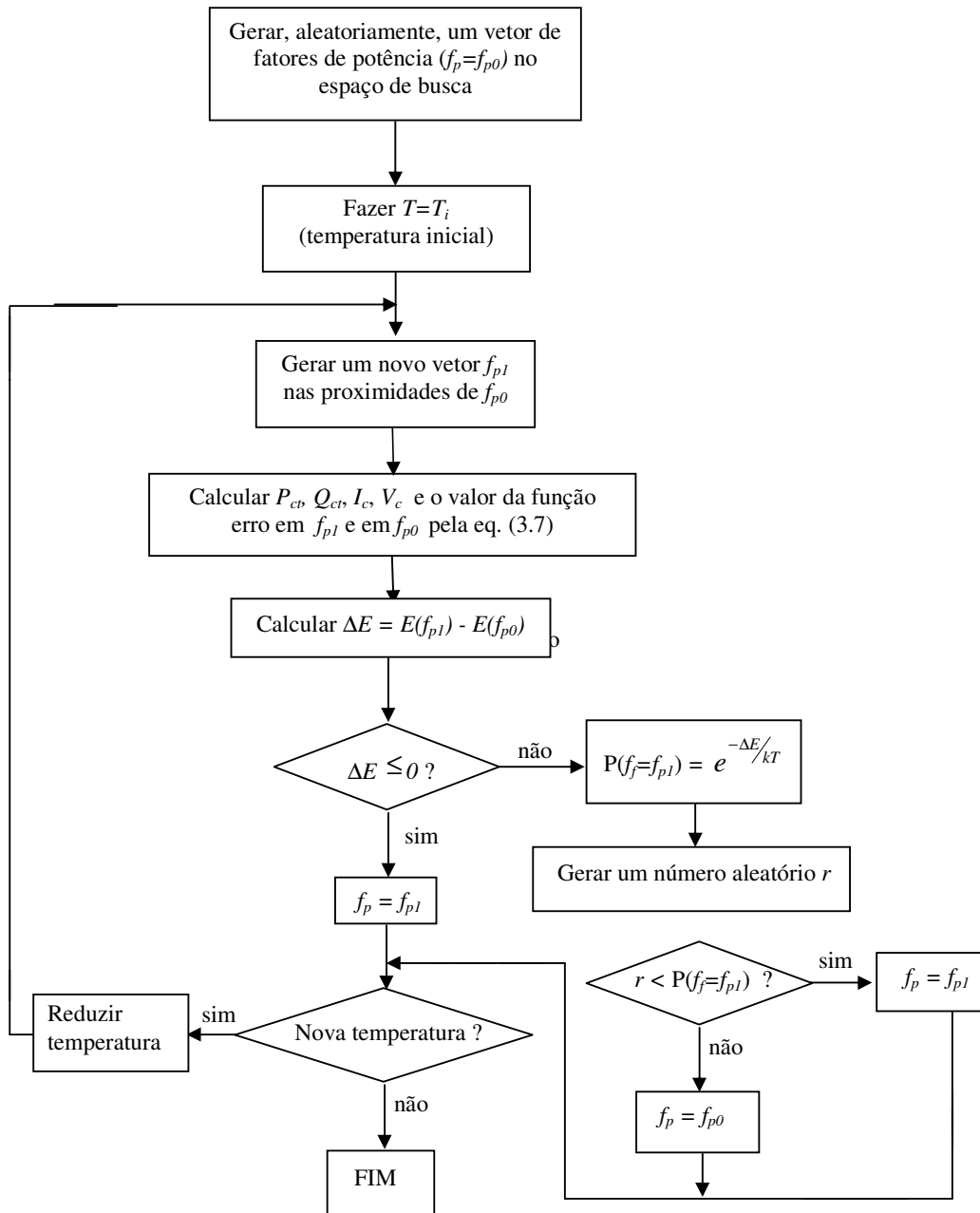


Figura 3.2 – Algoritmo do Estimador de Subestação de Média Tensão

### 3.2. ESTIMADOR DE ESTADO

Para entender a formulação do problema, suponha um alimentador fictício como o da figura 3.3. Na figura,  $P_m$  e  $Q_m$  são, respectivamente, a potência ativa e a potência reativa total medidas na entrada do alimentador,  $S_i$  ( $i = 1, \dots, 12$ ) é a potência do transformador de distribuição instalado na barra  $i$  e  $f_p$  e  $f_u$  são, respectivamente, o fator de potência e o fator de utilização. Supondo que todas as barras possuem o mesmo fator de potência e mesmo fator de utilização, as potências na entrada do alimentador,  $P_m$  e  $Q_m$ , deverão ser suficientes para suprir todas as cargas das barras além das perdas totais do alimentador,  $\Delta P_{total}$  e  $\Delta Q_{total}$ . Assim,  $P_m$  e  $Q_m$  serão dadas pelas seguintes expressões:

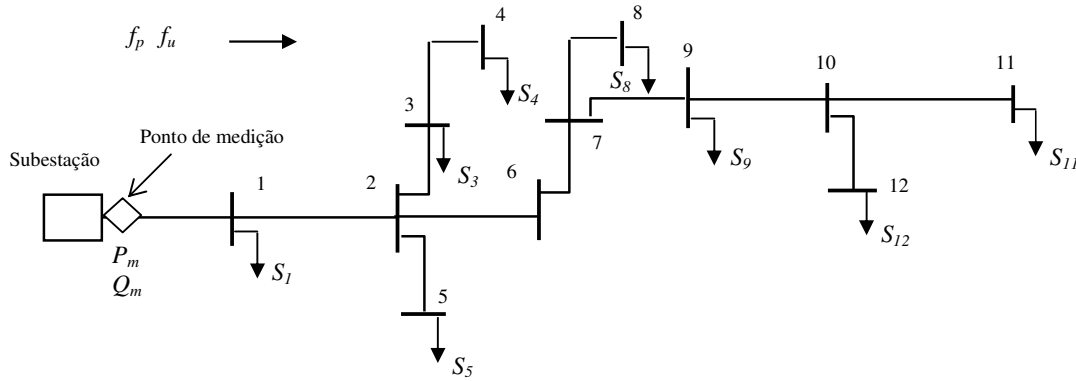


Figura 3.3 – Alimentador fictício

$$P_m = f_p \cdot f_u \cdot \sum S_i + \Delta P_{total} \quad (3.8)$$

$$Q_m = \sqrt{1 - f_p^2} \cdot f_u \cdot \sum S_i + \Delta Q_{total} \quad (3.9)$$

Supondo que o mesmo alimentador possua dois pontos de medição:

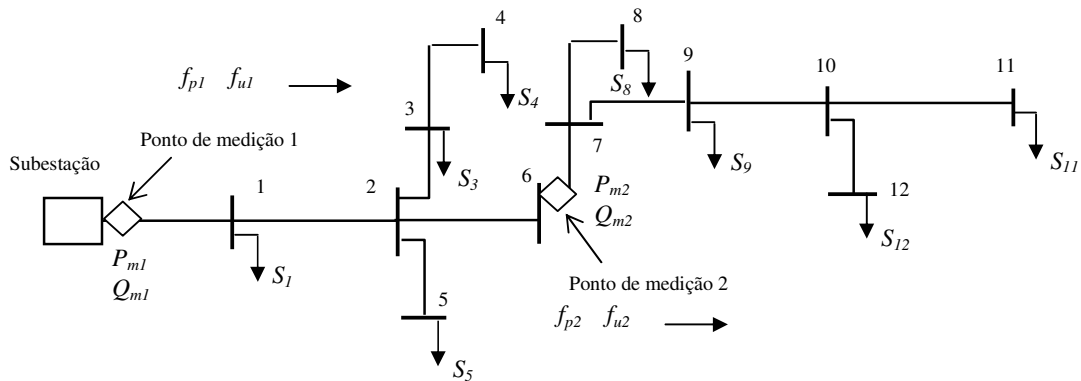


Figura 3.4 – Alimentador fictício

As cargas vinculadas ao ponto de medição 1 são as cargas entre os dois pontos de medição, ou seja, são as cargas compreendidas entre as barras 0 e 6, excluindo a barra 6, ou seja as cargas  $S_1$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  e  $S_5$ . As cargas vinculadas ao ponto de medição 2 são as cargas a jusante do ponto de medição 2, incluindo a barra da medição, ou seja, as cargas  $S_8$ ,  $S_9$ ,  $S_{11}$  e  $S_{12}$ . As perdas no ponto de medição 1 são iguais ao somatório das perdas dos trechos a jusante do ponto de medição 1 (todos os trechos do alimentador) e as perdas no ponto de medição 2 são iguais ao somatório das perdas dos trechos a jusante do ponto de medição 2. Esse tratamento de vinculação de perdas e cargas aos pontos de medição será adotado no algoritmo proposto.

Para o exemplo da figura 3.4, as equações (3.8) e (3.9) tornam-se:

$$P_{mj} = f_{pj} \cdot f_{uj} \cdot \sum S_{ij} + \Delta P_j \quad (3.10)$$

$$Q_{mj} = \sqrt{1 - f_{pj}^2} \cdot f_{uj} \cdot \sum S_{ij} + \Delta Q_j \quad (3.11)$$

em que:

$P_{mj}$  é a potência ativa trifásica medida ponto de medição  $j$ ;

$Q_{mj}$  é a potência reativa trifásica medida no de medição  $j$ ;

$\Delta P_j$  são as perdas ativas estimadas no ponto de medição  $j$ ;

$\Delta Q_j$  são as perdas reativas estimadas no ponto de medição  $j$ ;

$f_{pj}$  é o fator de potência atribuído às cargas vinculadas ao ponto de medição  $j$ ;

$f_{uj}$  é o fator de utilização atribuído às cargas vinculadas ao ponto de medição  $j$ ;

$S_{ij}$  é a potência dos transformadores vinculados ao ponto de medição  $j$ ;

O estimador de estado de alimentador de distribuição que foi concebido para efeito de elaboração desta dissertação é um programa computacional de dois módulos. O primeiro módulo realiza a estimação das perdas, sendo um algoritmo *simulated annealing* associado a uma rotina computacional de fluxo de carga baseada no método da soma de potências (MSP). O segundo módulo calcula os fatores de potência e de utilização, empregando, para isso, o valor das perdas estimado no primeiro módulo. A partir desses fatores, são estimadas as demandas ativa e reativa das barras e assim são calculadas as tensões de barra (vetor de estado) mediante a execução da rotina de fluxo de carga.



### 3.2.1. Estimador de Perdas Totais

O estimador de perdas totais é basicamente uma implementação do algoritmo *simulated annealing* já conhecido, cuja função-objetivo a ser minimizada é o somatório dos erros entre as grandezas medidas e as grandezas calculadas no programa de fluxo de carga. As grandezas medidas são corrente, tensão, potência ativa e potência reativa.

As potências ativas e reativas próprias nas barras do alimentador com transformador de distribuição,  $P_{Li}$  e  $Q_{Li}$ ; são dadas pelas seguintes expressões (Medeiros Jr. *et al*, 2002):

$$P_{Li} = S_i \cdot f_{ui} \cdot f_{pi} \quad (3.12)$$

$$Q_{Li} = S_i \cdot f_{ui} \cdot \sqrt{1 - f_{pi}^2} \quad (3.13)$$

em que  $S_i$ ,  $f_u$  e  $f_{pi}$  são, respectivamente, a potência nominal total trifásica, o fator de utilização e o fator de potência do transformador instalado na barra  $i$ .

Algumas barras apresentam consumidores especiais, os chamados consumidores do grupo A, que possuem cargas elevadas e são, normalmente, indústrias ou comércios. Desses consumidores, são conhecidos o fator de potência  $f_{pm}$  e a demanda contratada,  $D_m$ , normalmente em kW. Assim, as potências ativas e reativas próprias nas barras de consumidor do grupo A são dadas pelas seguintes expressões (Medeiros Jr. *et al*, 2002):

$$P_{Li} = D_{mi} \cdot f_{ui} \quad (3.14)$$

$$Q_{Li} = D_{mi} \cdot f_{ui} \cdot \text{tg}(\text{acos}(f_{pmi})) \quad (3.15)$$

em que  $D_{mi}$ ,  $f_{ui}$  e  $f_{pmi}$  são, respectivamente, é a demanda contratada, o fator de utilização e o fator de potência medido do consumidor do grupo A ligado à barra  $i$ .

As grandezas calculadas são a tensão, a corrente, as potências ativas e as potências reativas obtidas no programa de fluxo de carga MSP, apresentado no capítulo 2:

$$P_{ci} = P_i + \Delta P_i \quad (3.16)$$

$$Q_{ci} = Q_i + \Delta Q_i \quad (3.17)$$

$$V_{ci} = \frac{\sqrt{P_{ci}^2 + Q_{ci}^2}}{\sqrt{3} \cdot I_{mi}} \quad (3.18)$$

$$I_{ci} = \frac{\sqrt{P_{ci}^2 + Q_{ci}^2}}{\sqrt{3} \cdot V_{mi}} \quad (3.19)$$

em que:

$P_i, Q_i$  são dadas pelas equações (2.3.a), (2.3.b), (2.4.a) e (2.4.b) em conjunto;

$\Delta P_i, \Delta Q_i$  são dadas pelas equações (2.17.a) e (2.17.b);

$V_{mi}$  é a tensão de linha medida na barra  $i$ ;

$I_{mi}$  é a corrente de linha medida na barra  $i$ .

A função-objetivo,  $E(f_p, f_u)$ , a ser minimizada é:

$$E(f_p, f_u) = 0,5 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^k [(V_{mi} - V_{ci})^2 + (I_{mi} - I_{ci})^2 + (P_{mi} - P_{ci})^2 + (Q_{mi} - Q_{ci})^2]} \quad (3.20)$$

O algoritmo inicia com uma estimativa aleatória  $(f_p, f_{u0})$  dos fatores de potência e fatores de utilização de cada barra do sistema (menos a barra da subestação),  $f_p, f_{ui}$ , que gerarão as potências ativas e reativas próprias, dadas pelas equações (3.12) a (3.15). As potências obtidas dessa forma serão os dados de entrada do programa de fluxo de carga MSP. É dada uma perturbação na solução inicial  $f_p, f_{u0}$ , ou seja, encontra-se outra solução  $f_p, f_{u1}$  nas proximidades  $f_p, f_{u0}$  e calcula-se o valor de  $E(f_p, f_u)$  pela equação (3.20) nesses dois pontos, seguindo-se o algoritmo de Metropolis básico para escolha da solução corrente. Quando termina o processo da têmpera, têm-se estimadas as perdas do alimentador.

O algoritmo do estimador de perdas totais pode ser visto na figura 3.5, abaixo:

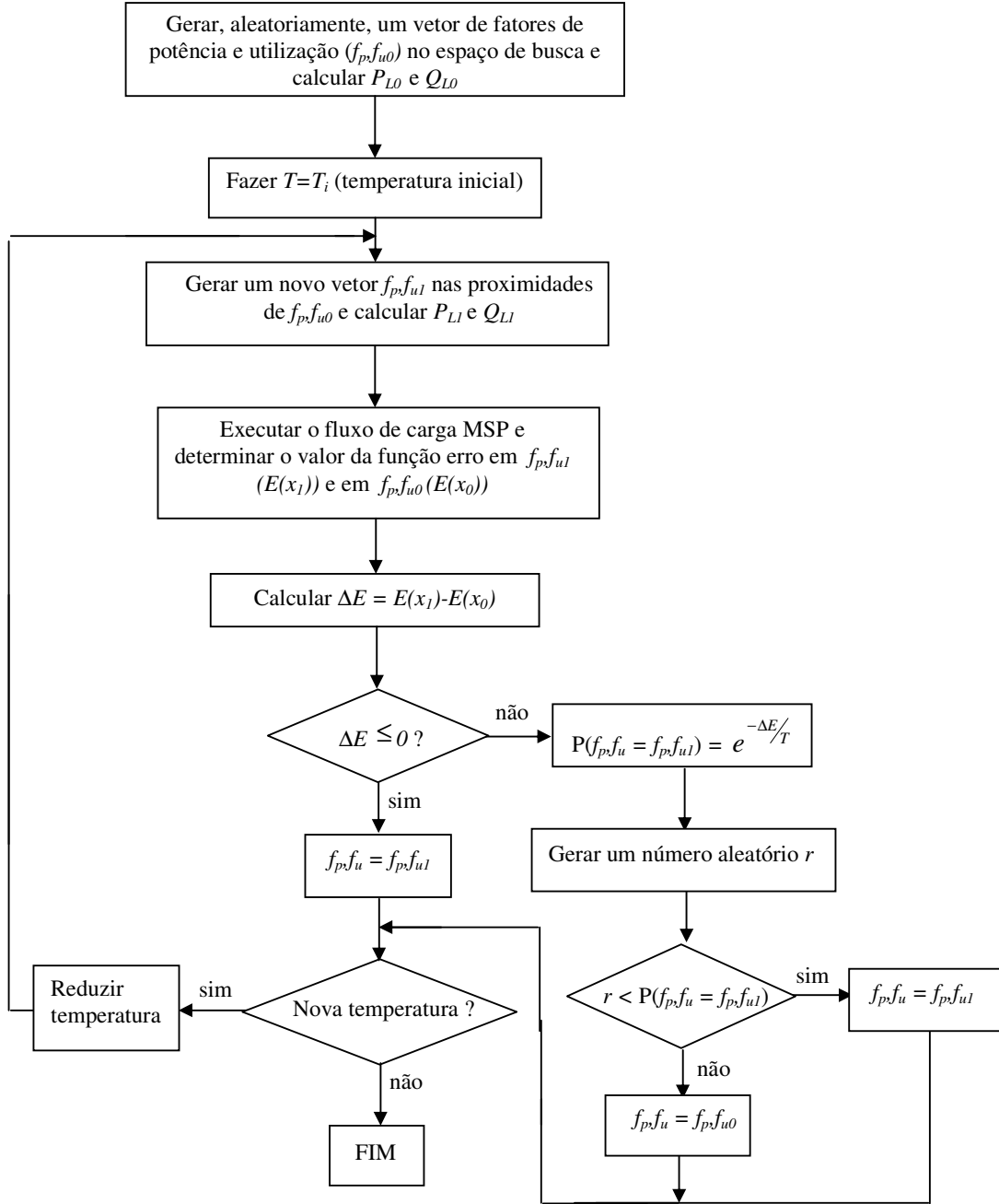


Figura 3.5 – Algoritmo do Estimador de Perdas Totais

### 3.2.2. Cálculo do Fator de Potência e do Fator de Utilização

O *estimador de perdas totais* retorna o valor aproximado das perdas técnicas do alimentador,  $\Delta P + j\Delta Q$ . A partir dessa estimação, encontram-se os valores de fator de

potência e de fator de utilização que serão atribuídos ao alimentador, resolvendo-se o sistema de duas equações e duas incógnitas resultante da expressão abaixo:

$$\begin{aligned} (P_{mj} + jQ_{mj}) - (\Delta P_j + j\Delta Q_j) = & \left\{ \left( f_{pj} \cdot f_{uj} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} S_{ij} \right) + \left( f_{uj} \cdot \sum_{k=1}^{n_g} D_{mkj} \right) \right\} + \\ & j \left\{ \left( \sqrt{1 - f_{pj}^2} \cdot f_{uj} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} S_{ij} \right) + \left( f_{uj} \cdot \sum_{k=1}^{n_g} \text{tg}(\text{acos}(f_{pmkj})) \cdot D_{mkj} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.21)$$

em que:

$P_{mj}$  é a potência ativa trifásica medida ponto de medição  $j$ ;

$Q_{mj}$  é a potência reativa trifásica medida no de medição  $j$ ;

$\Delta P_j$  são as perdas ativas estimadas no ponto de medição  $j$ ;

$\Delta Q_j$  são as perdas reativas estimadas no ponto de medição  $j$ ;

$f_{pj}$  é o fator de potência atribuído às cargas vinculadas ao ponto de medição  $j$ ;

$f_{uj}$  é o fator de utilização atribuído às cargas vinculadas ao ponto de medição  $j$ ;

$S_{ij}$  é a potência dos transformadores de distribuição vinculados ao ponto de medição

$j, i=1,2,\dots,n_{tj}$ ;

$n_{tj}$  é o número de transformadores de distribuição vinculados ao ponto de medição  $j$ ;

$D_{mkj}$  é a demanda do consumidor  $k$  do grupo A vinculado ao ponto de medição  $j$ ,

$k=1,2,\dots,n_{gj}$ ;

$n_{gj}$  é o número de consumidores do grupo A vinculados ao ponto de medição  $j$ ;

$f_{pmkj}$  é o fator de potência medido do consumidor  $k$  do grupo A vinculado ao ponto de medição  $j$ .

Fazendo:

$$\sum_{i=1}^{n_{tj}} S_{ij} = S_{TDj}$$

$$\sum_{k=1}^{n_{gj}} \text{tg}(\text{acos}(f_{pmkj})) \cdot D_{mkj} = S_{Qgj}$$

$$\sum_{k=1}^{n_{gj}} D_{mkj} = S_{Pgj}$$

Então:

$$\begin{aligned} P_{mj} + jQ_{mj} - \Delta P_j - j\Delta Q_j = & (f_{pj} \cdot f_{uj} \cdot S_{TDj}) + (f_{uj} \cdot S_{Pgj}) + \\ & j \left( \sqrt{1 - f_{pj}^2} \cdot f_{uj} \cdot S_{TDj} \right) + j(f_{uj} \cdot S_{Qgj}) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Separando-se as partes real e imaginária, temos:

$$\begin{cases} (f_{pj} \cdot f_{uj} \cdot S_{TDj}) + (f_{uj} \cdot S_{Pgj}) = P_{mj} - \Delta P_j \\ (\sqrt{1-f_{pj}^2} \cdot f_{uj} \cdot S_{TDj}) + (f_{uj} \cdot S_{Qgj}) = Q_{mj} - \Delta Q_j \end{cases}$$

Fazendo:

$$P_{mj} - \Delta P_j = A_j$$

$$Q_{mj} - \Delta Q_j = B_j$$

Temos:

$$\begin{cases} (f_{pj} \cdot f_{uj} \cdot S_{TDj}) + (f_{uj} \cdot S_{Pgj}) = A_j \end{cases} \quad (i)$$

$$\begin{cases} (\sqrt{1-f_{pj}^2} \cdot f_{uj} \cdot S_{TDj}) + (f_{uj} \cdot S_{Qgj}) = B_j \end{cases} \quad (ii)$$

De (i):

$$\begin{aligned} f_{uj} (S_{TDj} \cdot f_{pj} + S_{Pgj}) &= A_j \\ \Rightarrow f_{uj} &= \frac{A_j}{(S_{TDj} \cdot f_{pj} + S_{Pgj})} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Substituindo (3.23) em (ii):

$$\begin{aligned} \frac{A_j}{(S_{TDj} \cdot f_{pj} + S_{Pgj})} \cdot \sqrt{1-f_{pj}^2} \cdot S_{TDj} + \frac{A_j}{(S_{TDj} \cdot f_{pj} + S_{Pgj})} \cdot S_{Qgj} &= B_j \\ \Rightarrow A_j \cdot (\sqrt{1-f_{pj}^2} \cdot S_{TDj} + S_{Qgj}) &= B_j \cdot (S_{TDj} \cdot f_{pj} + S_{Pgj}) \\ \Rightarrow A_j \cdot S_{Qgj} - B_j \cdot S_{Pgj} &= B_j \cdot S_{TDj} \cdot f_{pj} - A_j \cdot \sqrt{1-f_{pj}^2} \cdot S_{TDj} \end{aligned}$$

Sejam:

$$A_j \cdot S_{Qgj} - B_j \cdot S_{Pgj} = C_j$$

$$B_j \cdot S_{TDj} = D_j$$

$$A_j \cdot S_{TDj} = E_j$$

Então:

$$\begin{aligned} C_j &= D_j \cdot f_{pj} - E_j \cdot \sqrt{1-f_{pj}^2} \\ \Rightarrow D_j \cdot f_{pj} - C_j &= E_j \cdot \sqrt{1-f_{pj}^2} \Rightarrow (D_j \cdot f_{pj} - C_j)^2 = (E_j \cdot \sqrt{1-f_{pj}^2})^2 \\ \Rightarrow D_j^2 \cdot f_{pj}^2 - 2 \cdot C_j \cdot D_j \cdot f_{pj} + C_j^2 &= E_j^2 \cdot (1-f_{pj}^2) = E_j^2 - E_j^2 \cdot f_{pj}^2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow f_{pj}^2 \cdot (D_j^2 + E_j^2) - 2 \cdot C_j \cdot D_j \cdot f_{pj} + (C_j^2 - E_j^2) = 0$$

Desta forma:

$$\Rightarrow f_{uj} = \frac{A_j}{(S_{TDj} \cdot f_{pj} + S_{Pgj})} \quad (3.24)$$

$$\Rightarrow f_{pj} = \frac{C_j D_j + \sqrt{C_j^2 D_j^2 - (D_j^2 + E_j^2) \cdot (C_j^2 - E_j^2)}}{(D_j^2 + E_j^2)} \quad (3.25)$$

em que:

$$A_j = P_{mj} - \Delta P_j$$

$$B_j = Q_{mj} - \Delta Q_j$$

$$C_j = A_j \cdot S_{Qgj} - B_j \cdot S_{Pgj}$$

$$D_j = B_j \cdot S_{TDj}$$

$$E_j = A_j \cdot S_{TDj}$$

$$S_{TDj} = \sum_{i=1}^{n_{ij}} S_{ij}$$

$$S_{Qgj} = \sum_{k=1}^{n_g} \text{tg}(\text{acos}(f_{pmj})) \cdot D_{mkj}$$

$$S_{Pgj} = \sum_{k=1}^{n_{gj}} D_{mkj}$$

Calculados os fatores de potência e de utilização pelas equações (3.24) e (3.25), respectivamente, tais valores são atribuídos às cargas vinculadas ao ponto de medição correspondente para realizar o ajuste de cargas, ou seja, calcular as potências próprias de todas as barras,  $P_L$  e  $Q_L$ , pelas equações (3.12) a (3.15). No final, executa-se um programa de fluxo de carga que retornará os valores das tensões nas barras e das perdas totais.

### 3.2.3. Algoritmo do Estimador de Estado

O algoritmo completo do estimador de estado pode ser visto no fluxograma da figura 3.6, abaixo:

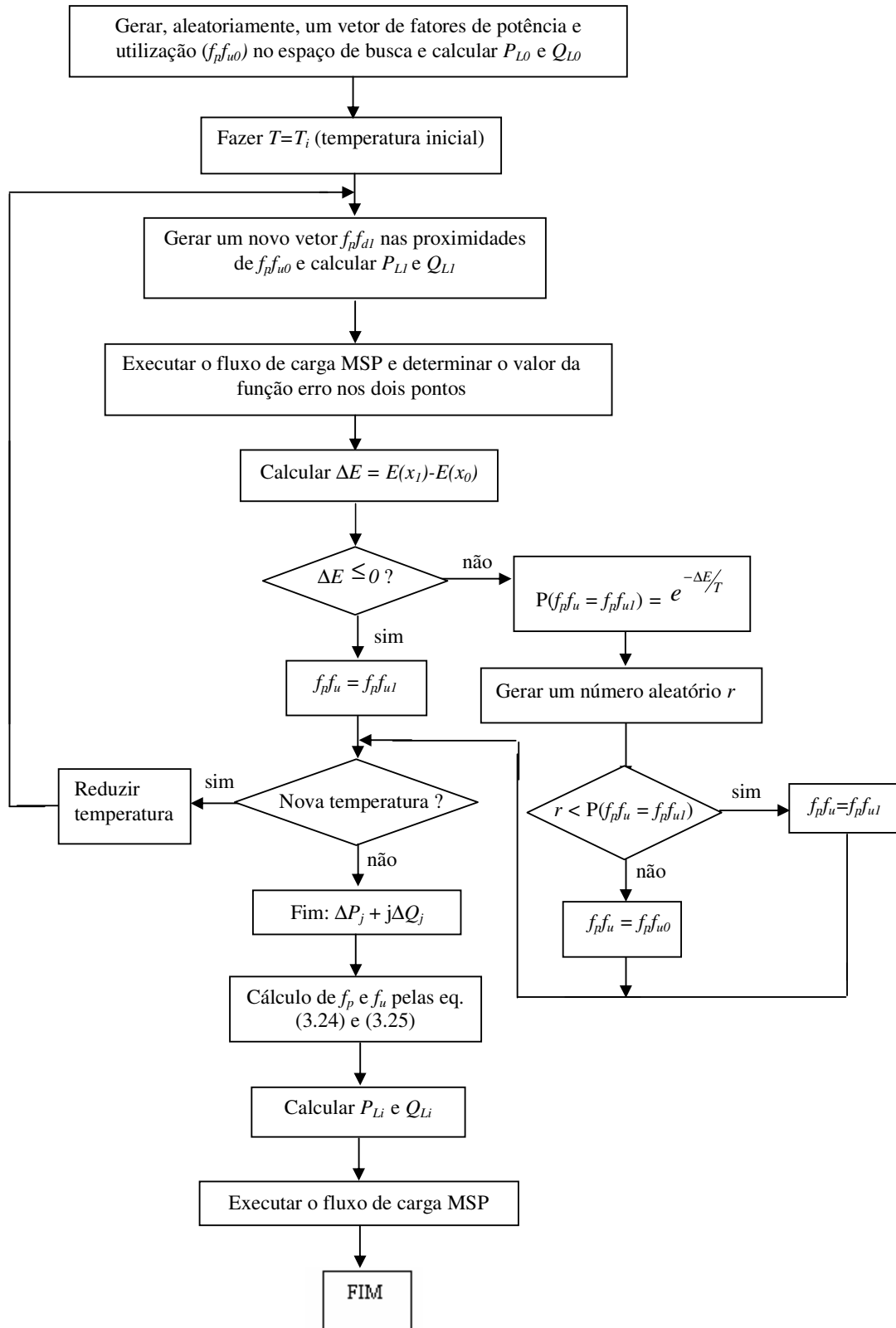


Figura 3.6 – Algoritmo Completo do Estimador de Estado

---

## CAPÍTULO 4

### ESTUDOS DE CASOS

#### 4.1 DADOS DE ENTRADA DOS PROGRAMAS

Os dados de entrada dos programas desenvolvidos nesta dissertação possuem o seguinte formato:

Coluna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dados	<i>de</i>	<i>para</i>	<i>r</i>	<i>x</i>	$S_i$	<i>comp</i>	$f_{pm}$	$V_m$	$P_m$	$Q_m$	$I_m$	<i>tipo</i>

Figura 4.1 – *Formato dos dados de entrada*

em que:

*de* é a barra origem;

*para* é a barra destino;

*r* é a resistência em ohm por quilômetro ou em ohm por milha;

*x* é a reatância indutiva em ohm por quilômetro ou em ohm por milha;

$S_i$  é a potência instalada em kVA ou a demanda do consumidor do grupo A em kW;

*comp* é o comprimento do trecho em quilômetros ou em milhas;

$f_{pm}$  é o fator de potência do consumidor do grupo A;

$V_m$  é a tensão de linha medida em kV;

$P_m$  é a potência ativa trifásica medida em kW;

$Q_m$  é a potência reativa trifásica medida em kvar;

$I_m$  é a corrente de linha medida em A;

*tipo* é o tipo de consumidor na barra, sendo:

0 = transformador de distribuição;

1 = consumidor do grupo A.

Para os alimentadores-teste usados para validação dos programas, são fornecidos os valores das potências ativas e reativas próprias das barras, ou seja, os valores  $P_{Li}$  e  $Q_{Li}$ . Esses valores em alimentadores reais são desconhecidos, por isso, trabalha-se com o valor da potência instalada, ou seja, da potência dos transformadores de distribuição em kVA.



Para simular os valores das potências instaladas em kVA nos alimentadores-teste, calcularam-se as potências totais pela equação:

$$S_i = \sqrt{P_{Li}^2 + Q_{Li}^2} \quad (4.1)$$

e aplicados, como potências instaladas, os valores dos transformadores de distribuição usuais no mercado mais próximos dos valores encontrados em (4.1).

Foram, também, simulados clientes do grupo A ao longo dos alimentadores. Para realizar tal estimação, considera-se como demanda do cliente do grupo A,  $D_m$ , (campo 5 da figura 4.1) o resultado da equação (4.1) em kW. O fator de potência do consumidor grupo A,  $f_{pm}$ , é obtido pela equação:

$$f_{pmi} = \frac{P_{Li}}{\sqrt{P_{Li}^2 + Q_{Li}^2}} \quad (4.2)$$

Apresentam-se, na tabela 4.1, os dados de entrada referentes ao alimentador IEEE-13 (figura 4.2), considerando-se carregamento próximo ao nominal e ausência de consumidores grupo A (ver dados reais no anexo 1):

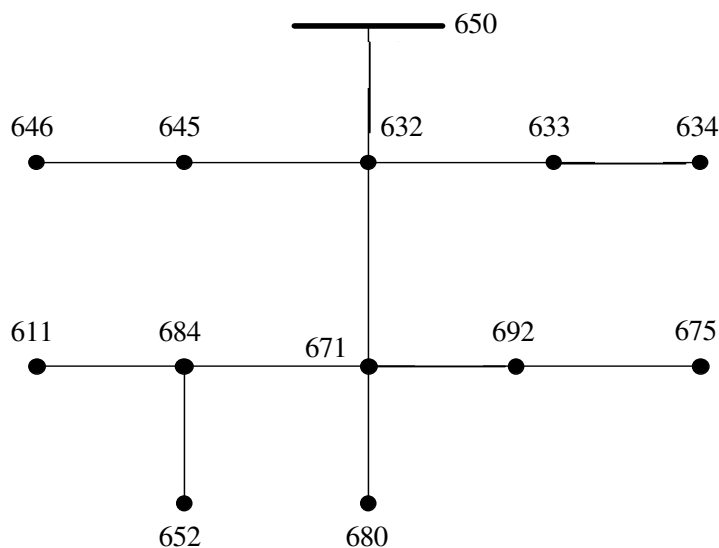


Figura 4.2 – Alimentador-teste de 13 barras do IEEE

Tabela 4.1 – Exemplo de arquivo de entrada – IEEE-13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
de	para	$R$	$x$	$S_i$	comp	$f_{pm}$	$V_m$	$P_m$	$Q_m$	$I_m$	tipo
650	632	0,186	0,421	75	0,3788	0	4,16	423,3	267,2	69,4	0
632	671	0,186	0,421	0	0,3788	0	0	0	0	0	0
671	680	0,186	0,421	0	0,1894	0	0	0	0	0	0
632	633	0,592	0,581	0	0,0947	0	0	0	0	0	0
633	634	0,507	0,922	225	1	0	0	0	0	0	0
632	645	1,12	0,656	75	0,0947	0	0	0	0	0	0
645	646	1,12	0,656	112,5	0,057	0	0	0	0	0	0
671	692	$1.10^{-6}$	$1.10^{-6}$	75	1	0	0	0	0	0	0
692	675	0,41	0,494	300	0,0947	0	0	0	0	0	0
671	684	1,12	0,656	0	0,057	0	0	0	0	0	0
684	611	1,12	0,656	75	0,057	0	0	0	0	0	0
684	652	1,12	0,656	0	0,15	0	0	0	0	0	0

## 4.2 ESTIMADOR PARA SUBESTAÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

O algoritmo do estimador para subestação de média tensão foi testado no sistema da figura 4.3 (Almeida, 2003):

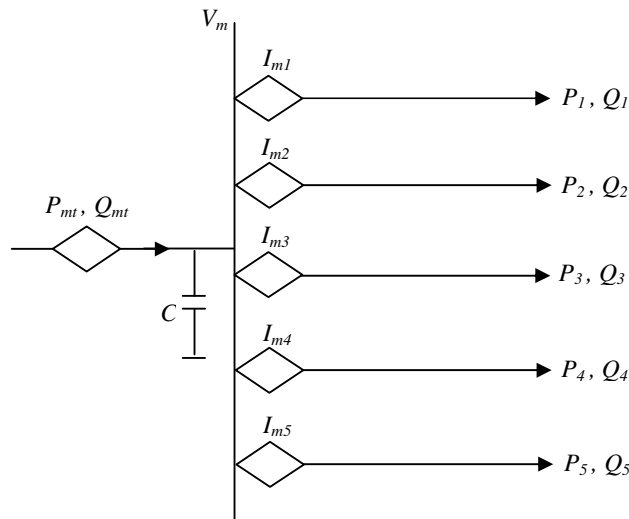


Figura 4.3 – Diagrama Unifilar do Barramento de uma Subestação de Média Tensão

Os valores fornecidos a seguir foram obtidos em Almeida, 2003, os quais são os dados de entrada do programa estimador para subestação de média tensão:

**1. Janela de Medição 1 (18h30min):**

Tensão no barramento da subestação: 14 kV;

Potência ativa no barramento: 12,9 MW;

Potência reativa no barramento: 6,1 Mvar;

Correntes nas entradas dos alimentadores:

Alimentador 1: 81 A;

Alimentador 2: 94 A;

Alimentador 3: 142 A;

Alimentador 4: 162 A;

Alimentador 5: 109 A.

**2. Janela de Medição 2 (5h45min):**

Tensão no barramento da subestação: 14,1 kV;

Potência ativa no barramento: 9 MW;

Potência reativa no barramento: 4,3 Mvar;

Correntes nas entradas dos alimentadores:

Alimentador 1: 52 A;

Alimentador 2: 72 A;

Alimentador 3: 102 A;

Alimentador 4: 94 A;

Alimentador 5: 88 A.

**3. Janela de Medição 3 (12h30min):**

Tensão no barramento da subestação: 13,9 kV;

Potência ativa no barramento: 11,2 MW;

Potência reativa no barramento: 5,5 Mvar;

Correntes nas entradas dos alimentadores:

Alimentador 1: 105 A;

Alimentador 2: 74 A;

Alimentador 3: 109 A;

Alimentador 4: 115 A;

Alimentador 5: 115 A.

As potências ativa e reativa são usualmente medidas no transformador de força da subestação. Devido à existência de um banco capacitor entre o barramento e o transformador (representado por  $C$  na figura 4.3), deve-se utilizar a seguinte expressão para determinação da potência reativa total pseudomedida no barramento (Almeida, 2003):

$$Q_{mt} = \sqrt{\left( \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sum_{i=1}^n I_{mi} \right)^2 - P_{mt}^2} \quad (4.3)$$

em que:

$Q_{mt}$  é a potência reativa total pseudomedida no barramento;

$P_{mt}$  é a potência ativa total medida no barramento;

$V_m$  é a tensão medida no barramento;

$I_{mi}$  é a corrente medida na entrada do alimentador  $i$ .

#### 4.2.1. Resultados Obtidos

Os resultados das estimações para as janelas de medição 1, 2 e 3 são apresentados nas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente. O erro relativo em porcentagem é dado pela seguinte expressão:

$$erro\ relativo\ (\%) = \frac{G_m - G_c}{G_m} \cdot 100 \quad (4.4)$$

em que  $G_m$  é a grandeza medida e  $G_c$  a grandeza calculada no estimador.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos – Janela de Medição 1

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erro Relativo (%)
Tensão no barramento (kV)	14,0	13,9997	0,0023
Corrente na entrada do Alimentador 1 (A)	81,0	81,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 2 (A)	94,0	94,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 3 (A)	142,0	142,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 4 (A)	162,0	162,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 5 (A)	109,0	109,0	0,0000
Potências na entrada do barramento (kW)	12.900,0	12.899,5	0,0036
(kvar)	6.073,5	6.073,7	-0,0036
Potências na entrada do Alimentador 1 (kW)	-	1.773,0	-
(kvar)	-	845,3	-
Potências na entrada do Alimentador 2 (kW)	-	2.053,1	-
(kvar)	-	990,2	-

Tabela 4.2 – Resultados obtidos – Janela de Medição 1 (continuação)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erro Relativo (%)
Potências na entrada do Alimentador 3 (kW)	-	3.112,0	-
(kvar)	-	1.473,7	-
Potências na entrada do Alimentador 4 (kW)	-	3.556,9	-
(kvar)	-	1.667,3	-
Potências na entrada do Alimentador 5 (kW)	-	2.404,5	-
(kvar)	-	1.097,4	-

Tabela 4.3 – Resultados obtidos – Janela de Medição 2

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erro Relativo (%)
Tensão no barramento (kV)	14,1	14,0997	0,0024
Corrente na entrada do Alimentador 1 (A)	52,0	52,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 2 (A)	72,0	72,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 3 (A)	102,0	102,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 4 (A)	94,0	94,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 5 (A)	88,0	88,0	0,0000
Potências na entrada do barramento (kW)	9.000,0	9.000,2	-0,0026
(kvar)	427,6	427,49	0,0245
Potências na entrada do Alimentador 1 (kW)	-	1.145,2	-
(kvar)	-	548,9	-
Potências na entrada do Alimentador 2 (kW)	-	1.592,7	-
(kvar)	-	745,0	-
Potências na entrada do Alimentador 3 (kW)	-	2.239,0	-
(kvar)	-	1.091,9	-
Potências na entrada do Alimentador 4 (kW)	-	2.075,0	-
(kvar)	-	982,1	-
Potências na entrada do Alimentador 5 (kW)	-	1.948,4	-
(kvar)	-	907,0	-

Tabela 4.4 – Resultados obtidos – Janela de Medição 3

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erro Relativo (%)
Tensão no barramento (kV)	13,9	13,8997	0,0020
Corrente na entrada do Alimentador 1 (A)	105,0	105,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 2 (A)	74,0	74,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 3 (A)	109,0	109,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 4 (A)	115,0	115,0	0,0000
Corrente na entrada do Alimentador 5 (A)	115,0	115,0	0,0000

Tabela 4.4 – Resultados obtidos – Janela de Medição 3 (continuação)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erro Relativo (%)
Potências na entrada do barramento (kW)	11.200,0	11.199,4	0,0053
(kvar)	5.485,3	5.486,0	-0,0118
Potências na entrada do Alimentador 1 (kW)	-	2.270,8	-
(kvar)	-	1.110,8	-
Potências na entrada do Alimentador 2 (kW)	-	1.602,0	-
(kvar)	-	779,6	-
Potências na entrada do Alimentador 3 (kW)	-	2.344,5	-
(kvar)	-	1.178,9	-
Potências na entrada do Alimentador 4 (kW)	-	2.485,3	-
(kvar)	-	1.220,2	-
Potências na entrada do Alimentador 5 (kW)	-	2.496,8	-
(kvar)	-	1.196,5	-

Sendo o *simulated annealing* um método de busca aleatória, cada vez que se executa o programa, chega-se a um valor ótimo que não necessariamente é o ótimo global, por isso, uma prática usual com esse tipo de algoritmo é executar várias vezes o programa e salvar o melhor resultado (Kirkpatrick *et al*, 1983). O programa foi desenvolvido em Matlab® e o tempo médio de simulação foi de 0,4 segundos, utilizando-se um computador Athlon XP 2200 (2,8 GHz de *clock* real) e 512 MB de memória RAM.

Observando as tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, verifica-se que os erros percentuais entre as grandezas medidas e as calculadas no estimador de estado de subestação de média tensão apresentam valores muito pequenos, significando uma excelente aproximação das grandezas medidas com as estimadas. Essa aproximação é importante porque os dados estimados (potências nas entradas dos alimentadores) servirão como dados de entrada para o estimador de perdas e, para que se tenha um bom desempenho desse estimador, é necessário diminuir a propagação de erros oriundos de seus dados de entrada.

### 4.3 ESTIMADOR DE ESTADO

Para testar o estimador de estado, utilizaram-se alimentadores-teste do IEEE de 13, 34, 37 e 123 barras (Kersting, 1991) (Kersting, 2000) e um alimentador-teste de 34 barras (Chris *et al*, 1997). Os dados desses alimentadores são apresentados nos anexos.

Os dados reais desses alimentadores foram inicialmente usados como dados de entrada para um programa de fluxo de carga MSP. Desta forma, obtiveram-se os valores das tensões nas barras, correntes e potências injetadas e das perdas totais e por trecho. Tendo esses valores, foi executado o estimador de estado *simulated annealing* e comparados os seus resultados com os resultados conhecidos.

Em todas as tabelas a seguir, as grandezas  $V$  e  $V_{est}$  são as tensões reais (obtidas com os valores reais) e as estimadas, respectivamente. As *perdas totais* são as perdas estimadas a partir do cálculo de  $f_p$  e  $f_u$  no final da estimação de estado. Os erros relativos em porcentagem são dados pela equação (4.4). As barras com (\*) são barras de medição.

### 4.3.1. Resultados Obtidos

#### 4.3.1.1. Alimentador IEEE-13

São apresentados, nas tabelas 4.5 e 4.6, os resultados obtidos para o alimentador IEEE-13 (anexo 1). O alimentador foi simulado tendo apenas medição na entrada do alimentador ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ), sem clientes grupo A e carregamento próximo ao nominal.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos – Alimentador IEEE-13

Nó	V (kV)	$V_{est}$ (kV)	Erro Relativo em V (%)
650 *	4,1600	4,1600	0,0000
632	4,1299	4,1299	-0,0007
671	4,1141	4,1155	-0,0336
680	4,1141	4,1155	-0,0336
633	4,1268	4,1260	0,0170
634	4,0884	4,0798	0,2091
645	4,1252	4,1248	0,0086
646	4,1129	4,1108	0,0509
692	4,1141	4,1155	-0,0336
675	4,1097	4,1117	-0,0475
684	4,1130	4,1143	-0,0310
611	4,1119	4,1131	-0,0284
652	4,1130	4,1143	-0,0310

Tabela 4.6 – Resultados obtidos – Alimentador IEEE-13

Grandezas	Reais	Estimadas	Erro relativo (%)
Potência ativa na entrada do alimentador (kW)	423,3274	405,4880	4,2141
Potência reativa na entrada do alimentador (kvar)	267,2507	297,4645	-11,3054
Corrente na entrada do alimentador (A)	69,4803	69,7952	-0,4532
Fator de Potência	-	0,8499	-
Fator de Utilização	-	0,9122	-
Perdas ativas totais (kW)	1,8540	1,9896	<b>-7,3164</b>
Perdas reativas totais (kvar)	3,6324	3,7788	<b>-4,0293</b>
Tempo médio de simulação	(s)		1,5

#### 4.3.1.2. Alimentador IEEE-34

São apresentados nas tabelas 4.7 e 4.8 os resultados obtidos para o alimentador IEEE-34 (anexo 3). O alimentador foi simulado tendo duas medições: na entrada do alimentador ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ) e na barra 824 ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ); com clientes grupo A nas barras 816, 854, 832 e 842 e com carregamento próximo ao nominal.

Tabela 4.7 – Resultados obtidos – Alimentador IEEE-34

Nó	V (kV)	V <sub>est</sub> (kV)	Erro Relativo em V (%)
800 *	26,1450	26,1450	0,0000
802	26,1270	26,1265	0,0018
806	26,1152	26,1144	0,0030
808	25,8960	25,8897	0,0242
812	25,6431	25,6323	0,0422
814	25,4426	25,4281	0,0567
850	25,4425	25,4280	0,0567
816	25,4396	25,4251	0,0569
824 *	25,4395	25,4395	0,0000
826	25,4395	25,4395	0,0000
810	25,8960	25,8897	0,0242
818	25,4375	25,4229	0,0573
820	25,3908	25,3717	0,0755
822	25,3908	25,3717	0,0755
828	25,4326	25,4326	0,0000
830	25,2667	25,2663	0,0013
854	25,2626	25,2623	0,0012



Tabela 4.7 – Resultados obtidos – Alimentador IEEE-34 (continuação)

Nó	V (kV)	V <sub>est</sub> (kV)	Erro Relativo em V (%)
856	25,2626	25,2623	0,0012
852	24,9726	24,9796	-0,0279
832	24,9725	24,9795	-0,0279
858	24,9471	24,9551	-0,0321
864	24,9471	24,9551	-0,0321
888	21,7024	21,4273	1,2679
890	21,6824	21,4066	1,2719
834	24,9179	24,9270	-0,0365
860	24,9154	24,9245	-0,0367
836	24,9140	24,9233	-0,0371
840	24,9139	24,9231	-0,0371
842	24,9171	24,9262	-0,0367
844	24,9131	24,9225	-0,0377
846	24,9114	24,9208	-0,0376
848	24,9112	24,9206	-0,0376
862	24,9140	24,9232	-0,0371
838	24,9140	24,9232	-0,0371

Tabela 4.8 – Resultados obtidos – Alimentador IEEE-34

Grandezas	Reais	Estimadas	Erro relativo (%)
Potência ativa na entrada do alimentador (kW)	365,4616	360,5464	1,3449
Potência ativa na barra 824 (kW)	308,6313	305,8768	0,8925
Potência reativa na entrada do alimentador (kvar)	225,8898	222,0734	1,6895
Potência reativa na barra 824 (kvar)	195,9968	188,7495	3,6982
Corrente na entrada do alimentador (A)	9,4875	9,3509	1,4400
Corrente na barra 824 (A)	8,2974	8,1572	1,6900
Fator de Potência (ponto de medição 1)	-	0,8607	-
Fator de Potência (ponto de medição 2)	-	0,8562	-
Fator de Utilização (ponto de medição 1)	-	0,7376	-
Fator de Utilização (ponto de medição 2)	-	0,7481	-
Perdas ativas totais (kW)	14,4870	14,4882	<b>-0,0084</b>
Perdas reativas totais (kvar)	14,4409	14,6576	<b>-1,5007</b>
Tempo médio de simulação (s)			4,3

#### 4.3.1.3. Alimentador AL-34 (Chris *et al*, 1997)

São apresentados na tabela 4.9 os resultados obtidos para o alimentador AL-34 (anexo 2). O alimentador foi simulado tendo apenas uma medição na entrada do alimentador ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ), sem clientes grupo A e com carregamento próximo ao nominal.

Tabela 4.9 – Resultados obtidos – Alimentador AL-34

Grandezas		Reais	Estimadas	Erro relativo (%)
Potência ativa na entrada do alimentador	(kW)	1.908,3	1.906,2	0,1060
Potência reativa na entrada do alimentador	(kvar)	1.163,7	1.167,5	-0,3267
Corrente na entrada do alimentador	(A)	117,3112	117,3246	-0,0115
Fator de Potência		-	0,8500	-
Fator de Utilização		-	0,8435	-
Perdas ativas totais	(kW)	34,1989	33,9015	<b>0,8696</b>
Perdas reativas totais	(kvar)	10,0601	9,9887	<b>0,7098</b>
Tempo médio de simulação			(s)	4,3

#### 4.3.1.4. Alimentador IEEE-37

São apresentados na tabela 4.10 os resultados obtidos para o alimentador IEEE-37 (anexo 4). O alimentador foi simulado como tendo apenas uma medição na entrada do alimentador ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ); com clientes grupo A nas barras 713, 725 e 737 e com carregamento próximo ao nominal.

Tabela 4.10 – Resultados obtidos – Alimentador IEEE-37

Grandezas		Reais	Estimadas	Erro relativo (%)
Potência ativa na entrada do alimentador	(kW)	475,2625	470,5426	0,9931
Potência reativa na entrada do alimentador	(kvar)	236,1826	239,9052	-1,5762
Corrente na entrada do alimentador	(A)	63,8349	63,5291	0,4790
Fator de Potência		-	0,8985	-
Fator de Utilização		-	0,7675	-
Perdas ativas totais	(kW)	1,3986	1,3785	<b>1,4344</b>
Perdas reativas totais	(kvar)	2,9244	2,8776	<b>1,6004</b>
Tempo médio de simulação			(s)	3,6

#### 4.3.1.5. Alimentador IEEE-123

São apresentados, na tabela 4.11 abaixo, resultados obtidos para o alimentador IEEE-123 (anexo 5). O alimentador foi simulado tendo três medições: na entrada do alimentador ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ), na barra 13 ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ) e na barra 60 ( $V$ ,  $I$ ,  $P$  e  $Q$ ); com clientes grupo A nas barras 7, 22, 38, 70, 92, 102 e 114 e com carregamento próximo ao nominal;

Tabela 4.11 – Resultados obtidos – Alimentador IEEE-123

Grandezas	Reais	Estimadas	Erro relativo (%)
Potência ativa na entrada do alimentador (kW)	706,2959	689,7299	2,3455
Potência ativa na barra 13 (kW)	645,1234	626,0462	2,9571
Potência ativa na barra 60 (kW)	377,5458	366,3296	2,9708
Potência reativa na entrada do alimentador (kvar)	439,1757	464,5301	-5,7732
Potência reativa na barra 13 (kvar)	405,2528	433,2282	-6,9032
Potência reativa na barra 60 (kvar)	249,8320	265,3744	-6,2211
Corrente na entrada do alimentador (A)	115,4288	115,4109	0,0154
Corrente na barra 13 (A)	106,4931	106,4216	0,0672
Corrente na barra 60 (A)	63,6040	63,5514	0,0826
Fator de Potência (ponto de medição 1)	-	0,8734	-
Fator de Potência (ponto de medição 2)	-	0,8714	-
Fator de Potência (ponto de medição 3)	-	0,8745	-
Fator de Utilização (ponto de medição 1)	-	0,8182	-
Fator de Utilização (ponto de medição 2)	-	0,8226	-
Fator de Utilização (ponto de medição 3)	-	0,8624	-
Perdas ativas totais (kW)	20,0141	19,9086	<b>0,5273</b>
Perdas reativas totais (kvar)	39,6830	39,2692	<b>1,0427</b>
Tempo médio de simulação		(s)	16,5

Os alimentadores foram testados várias vezes, sempre apresentando valores de erros próximos aos apresentados nas tabelas acima. O recurso utilizado para garantir uma boa solução é o mesmo da seção anterior, ou seja, executar o programa algumas vezes e salvar o melhor resultado. O programa foi desenvolvido em Matlab<sup>®</sup> e os tempos médios de simulação de cada execução do programa são apresentados nas tabelas dos alimentadores correspondentes. Para execução do programa, utilizou-se um computador Athlon XP 2200 (2,8 GHz de *clock* real) e 512 MB de memória RAM.

A grande aproximação na estimação das perdas e das tensões de barras é atribuída, principalmente, ao primeiro módulo do estimador de estado, no qual é feita a estimação das perdas totais do alimentador por *simulated annealing*. O algoritmo está livre para encontrar o ponto ótimo que minimiza a função-objetivo apresentada e os valores de fator de potência e de utilização gerados no primeiro módulo são transparentes para o usuário. Sendo o *simulated annealing* um método aleatório, cada vez que se executa o algoritmo, um novo vetor de fatores de potência e de utilização que minimiza a função-objetivo é encontrado, pois o problema, sendo extenso, possui vários ótimos. Esses valores de  $f_p$  e  $f_u$  encontrados no primeiro módulo não podem ser usados para caracterizar o alimentador, pois mudam totalmente a cada execução do programa. Para realizar o ajuste de cargas, utiliza-se o segundo módulo do estimador, o qual efetua o cálculo desses fatores dentro dos limites de fator de potência e de utilização reais.

Os alimentadores foram testados em diversas situações fictícias com o objetivo de testar a sensibilidade do estimador. Verificou-se, a partir dos testes, que o estimador consegue ajustar seus resultados de acordo com a situação presente. Como esperado, o aumento na quantidade de medições melhora a estimação, apresentando erros menores entre as grandezas medidas e as estimadas.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

#### 5.1. CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho, fez-se uma verificação do estado da arte dos métodos de estimação de estado de sistemas de distribuição de energia elétrica. Encontraram-se diversos trabalhos, ora abrangendo estimação de estado, ora abrangendo estudos de perdas; poucos associando os dois problemas em conjunto. É notória a dificuldade de realização de uma estimação de estado satisfatória devido à pequena quantidade de medições disponíveis e à imprevisibilidade das cargas do sistema de distribuição ao longo do tempo.

Em consequência dessas dificuldades, desenvolveram-se, neste trabalho, técnicas para realização da estimação de estado, determinação das perdas técnicas totais e ajuste de carga, mediante a utilização de medidas de tensão, corrente, potência ativa e potência reativa em tempo real.

O estimador de estado precisa de pelo menos um conjunto de medições de tensão, corrente, potência ativa e potência reativa para funcionar satisfatoriamente, entretanto, algumas subestações não dispõem de medição de fluxo de potência na entrada do alimentador, por isso, foi implementado um algoritmo para estimação dessas potências, para que possam ser usadas como dados de entrada do estimador de estado. O *estimador de subestação* é um algoritmo *simulated annealing* que estima as potências ativa e reativa na entrada dos alimentadores mediante o ajuste de seus fatores de potência, comparando as grandezas medidas com as calculadas no programa. O algoritmo proposto mostrou um bom desempenho na estimação dessas potências, como pode ser comprovado verificando-se as amplitudes dos erros encontrados entre as medidas disponíveis e as grandezas geradas pelo estimador (capítulo 4).

O *estimador de estado baseado em simulated annealing*, como visto no capítulo 3, é composto por duas partes distintas: um algoritmo *simulated annealing* para estimação de perdas totais e um posterior cálculo de fator de potência e fator de utilização para ajustar as cargas e completar a estimação mediante a execução de um programa de fluxo de carga. Durante os estudos realizados, compararam-se os resultados do estimador baseado em *simulated annealing* com os resultados da estimação pela curva de carga do alimentador

como um todo (capítulo 2). Verificaram-se resultados bastante satisfatórios com o estimador *simulated annealing*, com erros bem menores do que os obtidos com o método testado (Souza *et al*, 2005).

As maiores dificuldades observadas na implementação do estimador foi o ajuste do *simulated annealing* quanto ao número de iterações e ao tratamento de restrições. Era necessário determinar o número mínimo de iterações necessárias para que o programa gerasse soluções aceitáveis, com o menor tempo possível. Estabeleceram-se as quantidades de 50 iterações para esfriamento (diminuição de temperatura) e 10 iterações internas (equilíbrio térmico). O método de tratamento de restrições escolhido foi o *método da rejeição das configurações não-viáveis*, descrito no capítulo 2.

O estimador de estado apresenta resultados satisfatórios referentes à estimação das perdas totais e das tensões de barra, entretanto, os valores de perdas por trecho são muito diferentes dos reais. Isso acontece porque, ao realizar o ajuste de cargas, associando os fatores de potência e de utilização calculados a todas as barras do alimentador, os valores das potências próprias obtidas por esses fatores calculados não são os valores reais. Desta forma, o cálculo das perdas por trecho não corresponde à realidade, embora o valor das perdas totais apresente valores muito próximos dos reais.

Os alimentadores-teste foram simulados diversas vezes e em várias situações, de forma que a análise dos resultados não deixa dúvidas de que se atingiram satisfatoriamente os objetivos desta dissertação. O método proposto apresenta como principais vantagens a facilidade de implementação, a rapidez na execução e a simplicidade dos cálculos utilizados para obtenção dos valores requeridos.

## **5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho, ao propor um método para cálculo de perdas e estimação de estado utilizando *simulated annealing*, não teve a intenção de ser exaustivo, de forma que é necessária a sua continuação para aperfeiçoamento das técnicas utilizadas. Assim, apresentam-se, a seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros.

Os testes realizados nesta dissertação utilizaram alimentadores conhecidos e de pequeno e médio porte (entre 13 e 123 barras). É necessário, pois, o uso de alimentadores reais e de grande porte para se avaliar o desempenho do estimador. Nessa avaliação, podem-se utilizar outros métodos convencionais e compará-los com o algoritmo proposto.

Outra medida importante a ser tomada, quando o método for aplicado a alimentadores reais, é verificar a necessidade de um tratamento dos erros de medição na função-objetivo, visto que as medidas efetuadas possuem geralmente diversos tipos de erros provenientes do sistema de medição como um todo.

Uma perspectiva que se vislumbra é a aplicação do *simulated annealing* no estudo da alocação ótima de medidores de tensão, corrente e potência ativa e reativa para aumentar a observabilidade do sistema e melhorar a estimação de estado.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS<sup>1</sup>

AHN, S. U.; PRIETO, H. S.; BATTANI, D. *I<sub>eqp</sub> – Corrente Equivalente em Perdas*. XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI. Salvador, novembro de 2002.

ALMEIDA, M. A. D. *Um Algoritmo para Estimação de Estado em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica com Base no Método da Soma de Potências*. Natal, 2003. 138p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

ALMEIDA, M. A. D.; SILVEIRA, D. B. F.; MEDEIROS JR, M. F. *Estimating Loads in Distribution Feeders Using a State Estimator Algorithm with Additional Adjustment of Transformers Loading Factors*. IEEE International Symposium on Circuits and Systems – ISCAS 2003. Bangkok, Thailand, 25 - 28 may 2003.

ALMEIDA FILHO, A.; PINHO, R.; RAMALHO, J.; STRAUCH, M.; VALENTE, A. *Simulador de Perdas Técnicas na Rede Secundária de Distribuição*. XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI. Salvador, novembro de 2002.

ALVES, H. N.; SOUZA, B. A.; BRAZ, H. D.; M.; KAGAN, N. *Optimal Capacitor Allocation in Electrical Distribution Systems Based on Typical Load Profiles*. IEEE PES T&D 2004 Latin America. São Paulo, Brasil, novembro de 2004.

ANJO, A. J. B. *A Têmpera Controlada por Entropia*. Portugal, 1999. 97p. Tese (Doutorado em Matemática) – Universidade de Aveiro, Portugal.

ANTONIO, A. B.; TORREÃO, J. R. A.; COUTTO FILHO, M. B. *Meter Placement for Power System State Estimation Using Simulated Annealing*. 2001 IEEE Porto Power Tech Conference – PPT 2001. Porto, Portugal, 10 – 13 september 2001.

---

<sup>1</sup> Baseada na NBR 6023/2000, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).



CESPEDES, R. *New Method for the Analysis of Distribution Networks*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 1, p. 391-396, jan. 1990.

CHRIS, M.; SALAMA, M. M. A.; JAYARAM, S. *Capacitor Placement in Distribution Systems Using Heuristic Search Strategies*. IEEE Proceedings Generation Transmission and Distribution, v. 144, n. 3, p. 225-230, mai. 1997.

DAS, D.; NAGI, H. S.; KOTHARI, D. P. *Novel Method for Solving Radial Distribution Networks*. IEEE Proceedings Generation Transmission and Distribution, v. 141, n. 4, p. 291-298, july. 1994.

DORADO, E. D. *Estimación de Estado en Sistemas de Energía Eléctrica*. Universidad de Vigo. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Grupo de Electrotecnia y Redes Eléctricas. Vigo, 2001.

FARIA, E. D.; SARAMAGO, S.F.P. *Otimização Utilizando Simulated Annealing*. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Matemática. Uberlândia, 2003. Disponível em: <[www.famat.ufu.br/sezimaria/saramago.html](http://www.famat.ufu.br/sezimaria/saramago.html)>. Acesso em: 10 mar. 2004.

GERL, M.; JANOT, C. *Physique MP2/PC2 – 3. Thermodynamique et Physique Statistique*. Librairie Hachette, 1970. 211p.

IZQUIERDO, V. B. *Aspectos da Fundamentação Teórica do Simulated Annealing*. Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/~ctg/pags/componentes.html>>. Acesso em: 17 jul. 2004.

OLIVEIRA, C. C. B.; KAGAN, N.; MÉFFE, A.; JONATHAN, S.; CAPARROZ, S.; CAVARETTI, J. L. *A New Method for the Computation of Technical Losses in Electrical Power Distribution Systems*. Congresso Internacional de Redes de Distribuição - CIRED, junho de 2001.

KERSTING, W. H. *Radial Distribution Test Feeders*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 6, n. 3, p. 975-985, ago. 1991.

KERSTING, W. H. *Radial Distribution Test Feeders*. IEEE Distribution System Analysis Subcommittee Report, in 2000 PES Summer Meeting. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacorn/testfeeders.html>>. Acesso em: 27 jul. 2004.

KIRKPATRICK, S.; GELATT JR., C. D.; VECCHI, M. P. *Optimization by Simulated Annealing*. Science, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 13 may 1983.

LI, K. *State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impacts*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, n. 2, p. 911-916, may 1996.

LU, C. N.; TENG, J. H.; LIU, W. H. E. *Distribution System State Estimation*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 10, n. 1, p. 229-240, feb. 1995.

MANHAES, L. R.; CAVELLUCCI, C.; LYRA FILHO, C.; FERNANDES, C. P.; FRANÇA, P. M. *Abordagem Unificada para a Instalação de Capacitores e Reconfigurações com Objetivo de Redução de Perdas*. II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL. Salvador, novembro de 2003.

MEDEIROS JR, M. F.; ALMEIDA, M. A. D. *Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Média Tensão com Base no Algoritmo da Soma de Potências – Parte II: Modelo Não-Linear*. XIV Congresso Brasileiro de Automática - CBA. Natal, setembro de 2002.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.; ROSENBLUTH, M.; TELLER, A.; TELLER, E. *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*. Journal of Chemical Physics, v. 21, p. 1087-1092, 1953. Apud KIRKPATRICK, S.; GELATT JR., C. D.; VECCHI, M. P. *Optimization by Simulated Annealing*. Science, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 13 mai. 1983.

MONTICELLI, A. J. *Electric Power System State Estimation*. Proceedings of the IEEE, v. 88, n. 2, p. 262-282, feb. 2000.

NORONHA, T. F.; DASILVA, M. M.; ALOISE, D. J. *Uma Abordagem sobre Estratégias Metaheurísticas*. Revista Eletrônica de Iniciação Científica, v. 1, n.1, ago. 2001. Disponível em: <<http://www.sbc.org.br/reic/edicoes/2001e1/>>. Acesso em: 11 mar. 2004.

PEREIRA, J.; SARAIVA, J. T.; LEÃO, M. T. P. *Identificação de Estratégias de Exploração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Simulated Annealing*. IV Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia - ELAB. Rio de Janeiro, junho de 1999.

ROYTELMAN, I.; SHAHIDEHPOUR, S. M. *State Estimation for Electric Power Distribution Systems in Quasi Real-Time Conditions*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 4, p. 2009-2015, octob. 1993.

SARAMAGO, S. F. P. *Métodos de Otimização Randômica: Algoritmos Genéticos e Simulated Annealing*. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Matemática. Uberlândia, 2003. Disponível em: <[www.famat.ufu.br/sezimaria/saramago.html](http://www.famat.ufu.br/sezimaria/saramago.html)>. Acesso em: 10 mar. 2004.

SCHWEPPE; F. C.; WILDES, J. *Power System Static State Estimation – Part I*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-89, n. 1, p. 120-125, jan. 1970.

GOUVÊA, J. P. S.; SIMÕES COSTA, A. J. A. *Estimador de Estados Ortogonal com Restrições de Igualdade*. SBA Controle & Automação, v. 9, n.3, p.141-148, set./dez. 1998.

SOARES, S.; MELLO NETO, A.; CARDOSO, A.; VIANA, F.; JAVARONI, M.; PEREIRA, M.; BRITO, W. *Metodologia para Determinação, Análise e Otimização de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição*. IV Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia - ELAB. Rio de Janeiro, junho de 1999.

SOUZA, B. A. *Distribuição de Energia Elétrica*. CCT/UFPB-REENGE/PAPE. Campina Grande, 1997.

SOUZA, B. A.; ALVES, H. N.; FERREIRA, H. A. *Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 9, n. 2, p. 1-6. 2004.

SOUZA, B. A.; SOUSA, A. A.; ALBUQUERQUE, J. M. C. *Power Losses on Distribution Network: Estimation Using Simulated Annealing*. Paper aceito para publicação em: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering – CCECE-2005. Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1 – 4 may 2005.

VALLE, A. C. M.; OLIVEIRA, A. M.; BRIGATTO, A. A.; ALVARENGA, M. B. *Proposta Metodológica para Análise de Perdas em Alimentadores Considerando os Indicadores de Qualidade de Energia*. II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL. Salvador, novembro de 2003.

---

# ANEXOS

## ALIMENTADOR-TESTE DE 13 BARRAS DO IEEE

### 1. Diagrama unifilar:

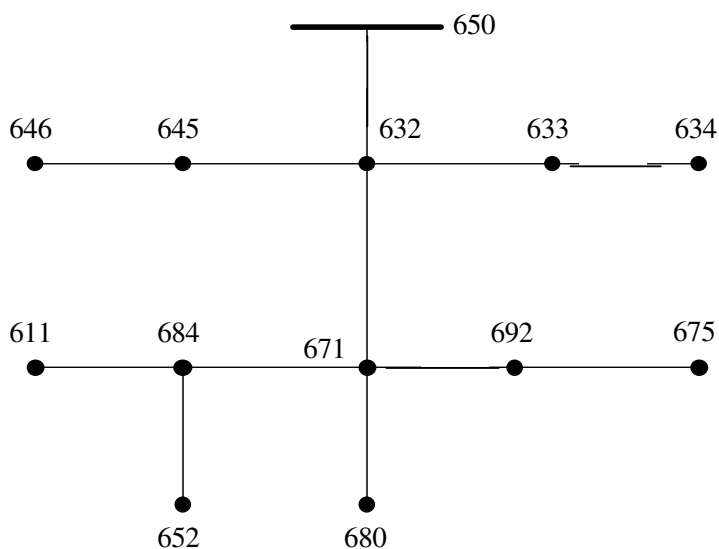


Figura A.1 – Diagrama unifilar do alimentador IEEE-13

### 2. Tensão no barramento da subestação: 4,16 kV

### 3. Dados dos nós e dos trechos:

Tabela A.1 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-13

Nó	Carga		Impedância		Comprimento	Carga instalada
	nº	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)	(kVA)
650		0,00	0,00	-	-	-
632		66,67	38,67	0,186	0,4211	75
671		0,00	0,00	0,186	0,4211	0

Tabela A.1 – *Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-13* (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
680	0,00	0,00	0,186	0,4211	0,1893	0
633	0,00	0,00	0,592	0,581	0,0946	0
634	133,33	96,67	0,5068	0,9216	0	225
645	56,67	41,67	1,12	0,656	0,0946	75
646	76,67	44,00	1,12	0,656	0,0568	112,5
692	56,67	50,33	1 E-6	1 E-6	0	75
675	281,00	154,00	0,41	0,4936	0,0946	300
684	0,00	0,00	1,12	0,656	0,0568	0
611	56,67	26,67	1,12	0,656	0,0568	75
652	0,00	0,00	1,12	0,656	0,1515	0

Obs.: Considerou-se carregamento próximo ao nominal para escolha das potências instaladas.

## ANEXO 2

### ALIMENTADOR-TESTE DE 34 BARRAS (Chris *et al*, 1997)

#### 1. Diagrama unifilar:

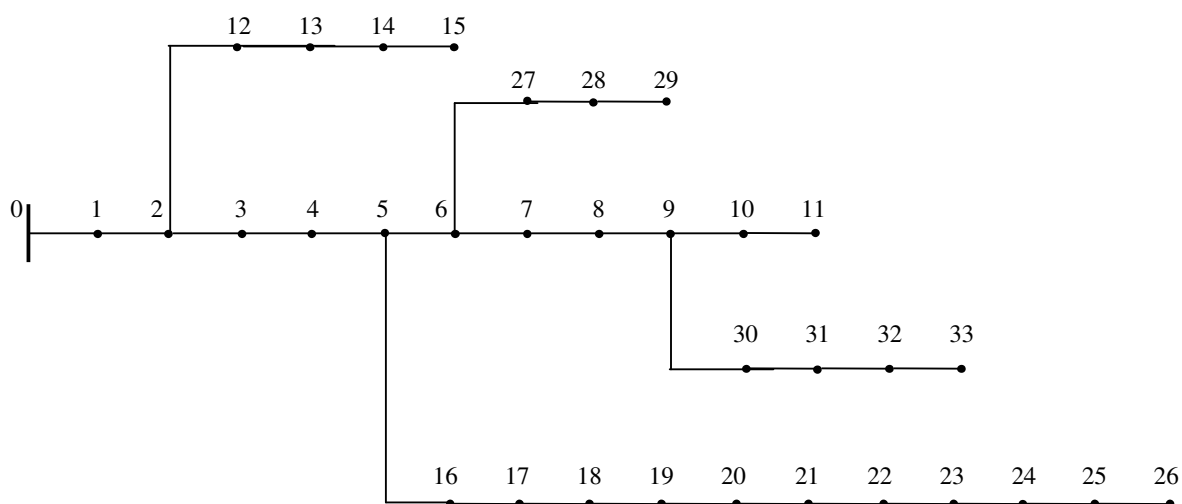


Figura A.2 – Diagrama unifilar do alimentador Al-34

#### 2. Tensão no barramento da subestação: 11 kV

#### 3. Dados dos nós e dos trechos:

Tabela A.2 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador AL-34

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (km)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /km)	x ( $\Omega$ /km)		
0	0,00	0,00	-	-	-	-
1	161,00	99,75	0,195	0,08	0,6	225



Tabela A.2 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador AL-34 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (km)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /km)	x ( $\Omega$ /km)		
2	0,00	0,00	0,195	0,08	0,55	0
3	161,00	99,75	0,299	0,083	0,55	225
4	161,00	99,75	0,299	0,083	0,5	225
5	0,00	0,00	0,299	0,083	0,5	0
6	0,00	0,00	0,524	0,09	0,6	0
7	161,00	99,75	0,524	0,09	0,4	225
8	161,00	99,75	0,524	0,09	0,6	225
9	0,00	0,00	0,524	0,09	0,4	0
10	161,00	99,75	0,524	0,09	0,25	225
11	82,20	50,40	0,524	0,09	0,2	112,5
12	46,80	29,25	0,524	0,09	0,3	75
13	46,80	29,25	0,524	0,09	0,4	75
14	46,80	29,25	0,524	0,09	0,2	75
15	9,45	5,25	0,524	0,09	0,1	15
16	161,00	99,75	0,299	0,083	0,6	225
17	161,00	99,75	0,299	0,083	0,55	225
18	161,00	99,75	0,378	0,086	0,55	225
19	161,00	99,75	0,378	0,086	0,5	225
20	161,00	99,75	0,378	0,086	0,5	225
21	161,00	99,75	0,524	0,09	0,5	225
22	161,00	99,75	0,524	0,09	0,5	225
23	161,00	99,75	0,524	0,09	0,6	225

Tabela A.2 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador AL-34 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (km)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega/\text{km}$ )	x ( $\Omega/\text{km}$ )		
24	161,00	99,75	0,524	0,09	0,4	225
25	161,00	99,75	0,524	0,09	0,25	225
26	82,20	51,00	0,524	0,09	0,2	112,5
27	56,25	36,00	0,524	0,09	0,3	75
28	56,25	36,00	0,524	0,09	0,3	75
29	56,25	36,00	0,524	0,09	0,3	75
30	35,91	21,74	0,524	0,09	0,3	45
31	35,91	21,74	0,524	0,09	0,4	45
32	35,91	21,74	0,524	0,09	0,3	45
33	35,91	21,74	0,524	0,09	0,2	45

Obs.: Considerou-se carregamento próximo ao nominal para escolha das potências instaladas.

## ALIMENTADOR-TESTE DE 34 BARRAS DO IEEE

### 1. Diagrama unifilar:

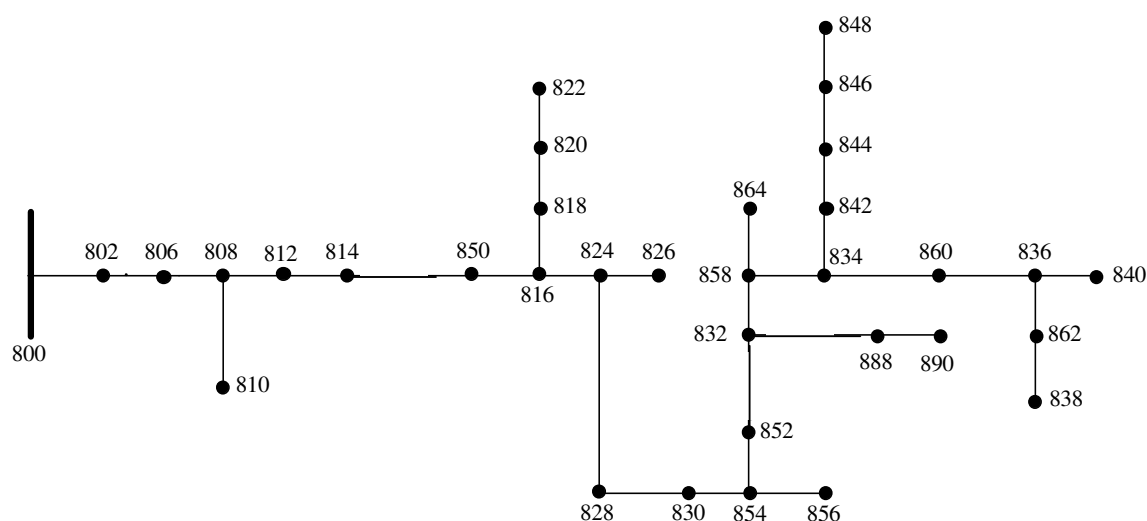


Figura A.3 – Diagrama unifilar do alimentador IEEE-34

### 2. Tensão no barramento da subestação: 26,145 kV

### 3. Dados dos nós e dos trechos:

Tabela A.3 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-34

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
800	0,00	0,00	-	-	-	-
802	18,33	9,67	1,12	0,656	0,4886	30
806	0,00	0,00	1,12	0,656	0,3276	0

Tabela A.3 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-34 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
808	5,33	2,67	1,12	0,656	6,1041	15
812	0,00	0,00	1,12	0,656	7,1022	0
814	0,00	0,00	1,12	0,656	5,6306	0
850	0,00	0,00	1,69	0,6646	0,0018	0
816	1,67	0,67	1,69	0,6646	0,0587	15
824	14,67	7,33	1,69	0,6646	1,9337	30
826	0,00	0,00	2,55	0,655	0,5738	0
810	0,00	0,00	2,55	0,655	1,0992	0
818	11,33	5,67	2,55	0,6551	0,3238	15
820	45,00	23,33	2,55	0,6551	9,1193	75
822	0,00	0,00	2,55	0,6551	2,6022	0
828	2,33	1,00	1,69	0,6646	0,1590	15
830	15,00	6,67	1,69	0,6646	3,8712	30
854	1,33	0,67	1,69	0,6646	0,0984	15
856	0,00	0,00	2,55	0,6551	4,4185	0
852	0,00	0,00	1,69	0,6646	6,9753	0
832	5,00	2,33	1,69	0,6646	0,0018	15
858	11,33	6,00	1,69	0,6646	0,9280	15
864	0,00	0,00	2,55	0,6551	0,3068	0
888	0,00	0,00	219,2	470,71	0	0
890	150,00	75,00	1,12	0,656	2	225
834	48,67	24,33	1,69	0,6646	1,1041	75

Tabela A.3 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-34 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
860	47,33	30,33	1,69	0,6646	0,3825	75
836	13,33	6,67	1,69	0,6646	0,5075	15
840	9,00	7,00	1,69	0,6646	0,1628	15
842	3,00	1,67	1,69	0,6646	0,0530	15
844	150,00	112,67	1,69	0,6646	0,2556	225
846	7,67	3,67	1,69	0,6646	0,6893	15
848	20,00	16,00	1,69	0,6646	0,1003	30
862	9,33	4,67	1,69	0,6646	0,0530	15
838	0,00	0,00	1,69	0,6646	0,9204	0

Obs.: Considerou-se carregamento próximo ao nominal para escolha das potências instaladas.

## ALIMENTADOR-TESTE DE 37 BARRAS DO IEEE

### 1. Diagrama unifilar:

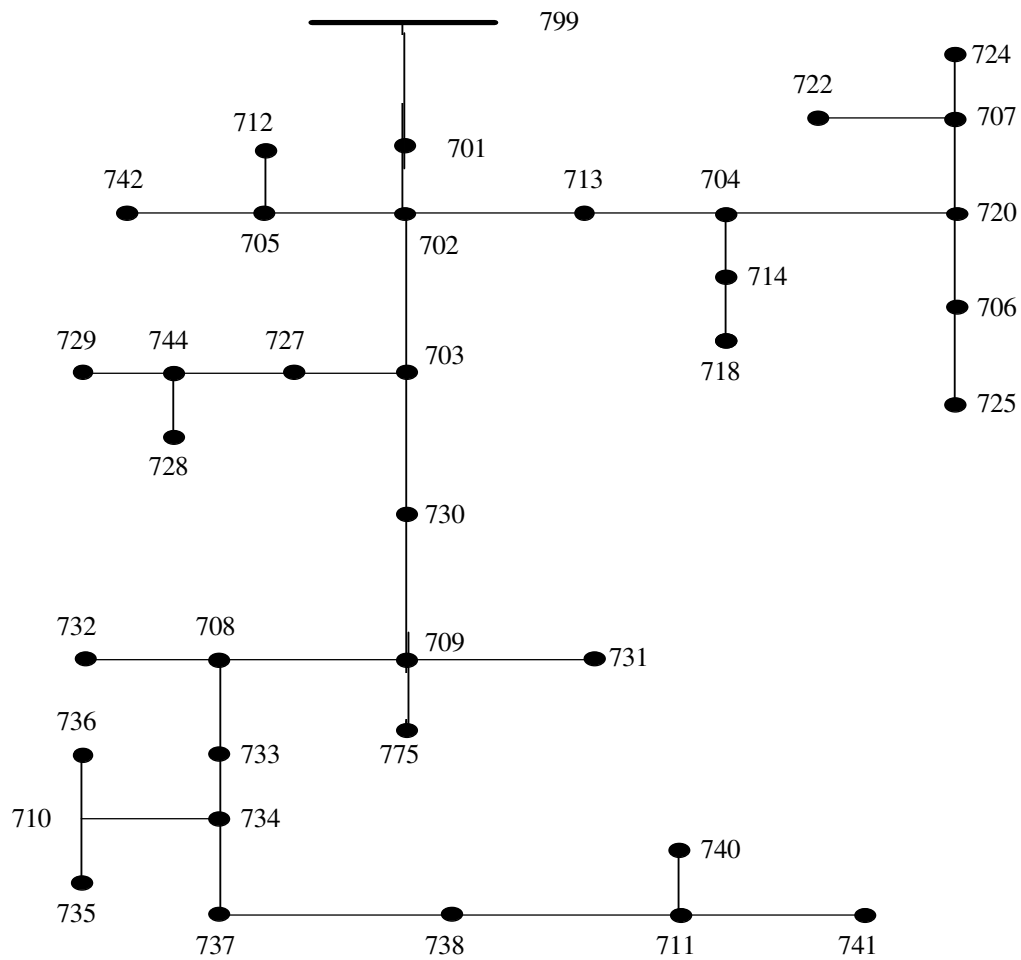


Figura A.4 – Diagrama unifilar do alimentador IEEE-37

### 2. Tensão no barramento da subestação: 4,8 kV

## 3. Dados dos nós e dos trechos:

Tabela A.4 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-37

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
799	0,00	0,00	-	-	-	-
701	210,00	105,00	0,105	0,4006	0,3503	300
702	0,00	0,00	0,206	0,4428	0,1818	0
703	0,00	0,00	0,206	0,4428	0,25	0
730	28,33	13,33	0,895	0,641	0,1136	45
709	0,00	0,00	0,895	0,641	0,0378	0
775	0,00	0,00	0,041	0,8340	0	0
713	28,33	13,33	0,895	0,641	0,0681	45
704	0,00	0,00	0,895	0,641	0,0984	0
720	28,33	13,33	0,895	0,641	0,1515	45
705	0,00	0,00	1,54	0,5738	0,0757	0
742	31,00	14,67	1,54	0,5738	0,0606	45
712	28,33	13,33	1,54	0,5738	0,0454	45
714	12,67	6,00	1,54	0,5738	0,0151	15
718	28,33	13,33	1,54	0,5738	0,0984	45
707	0,00	0,00	1,54	0,5738	0,1742	0
724	14,00	7,00	1,54	0,5738	0,1439	15
706	0,00	0,00	0,895	0,641	0,1136	0
725	14,00	7,00	1,54	0,5738	0,0530	15
722	53,67	26,67	1,54	0,5738	0,0227	75

Tabela A.4 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-37 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
727	14,00	7,00	1,54	0,5738	0,0454	15
744	14,00	7,00	0,895	0,641	0,0530	15
729	14,00	7,00	1,54	0,5738	0,0530	15
728	42,00	21,00	1,54	0,5738	0,0378	75
731	28,33	13,33	0,895	0,641	0,1136	45
708	0,00	0,00	0,895	0,641	0,0606	0
732	14,00	7,00	1,54	0,5738	0,0606	15
733	28,33	13,33	0,895	0,641	0,0606	45
734	14,00	7,00	0,895	0,641	0,1060	15
737	46,67	23,33	0,895	0,641	0,1212	75
738	42,00	20,67	0,895	0,641	0,0757	75
711	0,00	0,00	0,895	0,641	0,0757	0
741	14,00	7,00	0,895	0,641	0,0757	15
710	0,00	0,00	1,54	0,5738	0,0984	0
736	14,00	7,00	1,54	0,5738	0,2424	15
735	28,33	13,33	1,54	0,5738	0,0378	45
740	28,33	13,33	1,54	0,5738	0,0378	45

Obs.: Considerou-se carregamento próximo ao nominal para escolha das potências instaladas.



## ALIMENTADOR-TESTE DE 123 BARRAS DO IEEE

## 1. Diagrama unifilar:

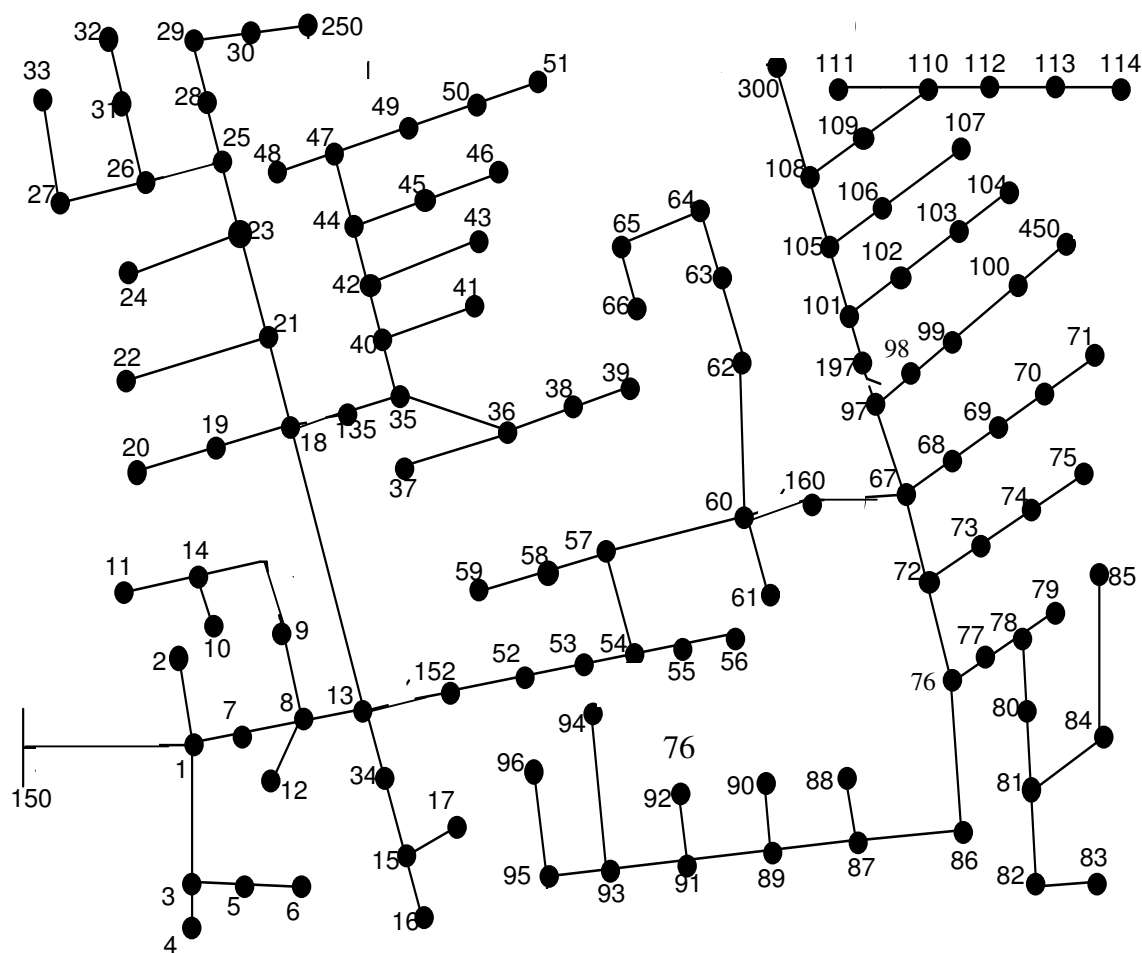


Figura A.5 – Diagrama unifilar do alimentador IEEE-123

## 2. Tensão no barramento da subestação: 4,16 kV

## 3. Dados dos nós e dos trechos:

Tabela A.5 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-123

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
150	0,00	0,00	-	-	-	-
1	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0757576	15
2	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0331439	15
3	0,00	0,00	1,12	0,656	0,0473485	0
4	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0378788	15
5	6,67	3,33	1,12	0,656	0,061553	15
6	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0473485	15
7	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,0568182	15
8	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0378788	0
9	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0426136	15
14	0,00	0,00	1,12	0,656	0,0804924	0
11	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0473485	15
13	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0568182	0
34	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0284091	15
10	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0473485	15
15	0,00	0,00	1,12	0,656	0,0189394	0
16	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0710227	15
17	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0662879	15
18	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,15625	0
19	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0473485	15

Tabela A.5 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-123 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
20	13,33	6,67	1,12	0,656	0,061553	15
21	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0568182	0
22	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0994318	15
23	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0473485	0
135	0,00	0,00	0,000001	0,000001	0	0
25	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0520833	0
26	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0662879	0
27	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0520833	0
28	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0378788	15
29	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0568182	15
30	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0662879	15
31	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0426136	15
32	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0568182	15
33	13,33	6,67	1,12	0,656	0,094697	15
12	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0426136	15
35	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0710227	15
36	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,1231061	0
152	0,00	0,00	0,000001	0,000001	0	0
38	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0473485	15
39	6,67	3,33	1,12	0,656	0,061553	15
40	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0473485	0
41	6,67	3,33	1,12	0,656	0,061553	15

Tabela A.5 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-123 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
42	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,0473485	15
43	13,33	6,67	1,12	0,656	0,094697	15
44	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0378788	0
45	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0378788	15
46	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0568182	15
47	35,00	25,00	0,306	0,450545	0,0473485	45
48	70,00	50,00	0,306	0,450545	0,0284091	112,5
49	46,67	33,33	0,306	0,450545	0,0473485	75
50	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0473485	15
51	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,0473485	15
52	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0757576	15
53	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0378788	15
54	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0236742	0
55	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,0520833	15
56	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,0520833	15
57	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0662879	0
58	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0473485	15
59	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0473485	15
60	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,1420455	15
61	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,1041667	0
62	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0473485	15
63	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0331439	15

Tabela A.5 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-123 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
64	25,00	11,67	1,12	0,656	0,0662879	30
65	46,67	33,33	1,12	0,656	0,0804924	75
160	0,00	0,00	1,95072	4,17792	0	0
67	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0662879	0
68	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0378788	15
69	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0520833	15
70	6,67	3,33	1,12	0,656	0,061553	15
197	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0473485	0
72	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0520833	0
73	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0520833	15
74	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0662879	15
75	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0757576	15
76	81,67	60,00	0,306	0,450545	0,0378788	112,5
77	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0757576	15
78	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0189394	0
79	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0426136	15
80	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0899621	15
81	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0899621	0
82	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0473485	15
83	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,0473485	15
84	6,67	3,33	1,12	0,656	0,1278409	15
85	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0899621	15

Tabela A.5 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-123 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
86	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,1325758	15
87	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0852273	15
88	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0331439	15
89	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0520833	0
90	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0426136	15
91	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0426136	0
92	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0568182	15
93	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0426136	0
94	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0520833	15
95	6,67	3,33	0,306	0,450545	0,0568182	15
96	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0378788	15
101	0,00	0,00	0,000001	0,000001	0	0
98	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0520833	15
99	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,1041667	15
100	13,33	6,67	0,306	0,450545	0,0568182	15
101	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0473485	0
102	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0426136	15
103	13,33	6,67	1,12	0,656	0,061553	15
104	13,33	6,67	1,12	0,656	0,1325758	15
105	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0520833	0
106	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0426136	15
107	13,33	6,67	1,12	0,656	0,1089015	15

Tabela A.5 – Dados dos nós e dos trechos do alimentador IEEE-123 (continuação)

Nó nº	Carga		Impedância		Comprimento (mi)	Carga instalada (kVA)
	P (kW)	Q (kvar)	r ( $\Omega$ /mi)	x ( $\Omega$ /mi)		
108	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,061553	0
109	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0852273	15
110	0,00	0,00	1,12	0,656	0,0568182	0
111	6,67	3,33	1,12	0,656	0,1089015	15
112	6,67	3,33	1,12	0,656	0,0236742	15
113	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0994318	15
114	6,67	3,33	1,12	0,656	0,061553	15
250	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,0378788	0
450	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,1515152	0
300	0,00	0,00	0,306	0,450545	0,1893939	0
71	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0520833	15
24	13,33	6,67	1,12	0,656	0,1041667	15
37	13,33	6,67	1,12	0,656	0,0568182	15
66	25,00	11,67	1,12	0,656	0,061553	30
610	0,00	0,00	0,000001	0,000001	0	0

Obs.: Considerou-se carregamento próximo ao nominal para escolha das potências instaladas.

---

## ÍNDICE REMISSIVO

### E

Estimação de Estado  
  corrente proporcional, 7  
  função do estimador de estado, 6  
  mínimos quadrados ponderados, 3, 7  
  pseudomedições, 6

### M

Método da Soma de Potências, 11  
  algoritmo, 12  
  perdas, 11, 12, 13  
  tensão, 12

### O

Otimização Combinatória  
  heurística, 14  
  metaheurística, 14  
  problemas de, 13

### P

Perdas  
  cálculo pela curva de carga do  
    alimentador, 9, 48  
  cálculo pela curva de carga típica, 10

  cálculo por estimação, 11  
  classificação, 8  
  comerciais, 8  
  corrente equivalente em perdas, 4  
  custo, 9  
  de energia, 8  
  globais, 2, 8  
  na distribuição, 8  
  na transmissão, 8  
  técnicas, 8

### R

Restrições  
  configurações não-viáveis, 20  
  transformação de variáveis, 20

### S

Simulated Annealing, 17  
  algoritmo de Metropolis, 15  
  descida aritmética, 19  
  descida exponencial, 19  
  descida linear, 19  
  têmpera, 14, 15  
  temperatura final, 18  
  temperatura inicial, 18